

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI**  
**FAKULTA STROJNÍ**

**Studijní program:** N0715A270014 – Materiálové inženýrství a výrobní technologie

**Studijní specializace:** Bez specializace

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**Problematika oprav svařovaných spojů za použití metody HFMI**

**Autor:** Bc. Jiří KEPKA

**Vedoucí práce:** Ing. Miloslav Kepka, Ph.D.

Akademický rok 2023/2024

# ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2023/2024

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: Bc. Jiří KEPKA  
Osobní číslo: S22N0026P  
Studijní program: N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie  
Téma práce: Problematika oprav svařovaných spojů za použití metody HFMI  
Zadávající katedra: Katedra materiálu a strojírenské metalurgie

### Zásady pro vypracování

- Úvod
- Životnost svařovaných spojů
- Principy metody High-Frequency Mechanical Impact (HFMI)
- Detekce trhlin a opary svařovaných spojů
- Experimentální program: únavové zkoušky opravovaných svarů
- Diskuse výsledků
- Závěr

Rozsah diplomové práce: **50-70 stran**  
Rozsah grafických prací: **fotodokumentace, obrázky**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

MARQUIS, Gary B. a BARSOU, Zuheir. IIW Recommendations for the HFMI Treatment. [s.l.] : Springer Singapore, 2016. 978-981-10-2503-7.

HOBACHER, A. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. Paris, France: International Institute of Welding, 2008. doc. XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Miloslav Kepka, Ph.D.**  
Regionální technologický institut

Konzultant diplomové práce: **Ing. Jan Tittel, IWE**  
Regionální technologický institut

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2023**  
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**

L.S.

---

**Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.**  
děkan

---

**Prof. Ing. Ludmila Kučerová, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

V Plzni dne: .....

.....

podpis autora

## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kepka	Jméno Jiří
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270014 Materiálové inženýrství a výrobní technologie	
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Kepka, Ph.D.	Jméno Miloslav
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KMM	
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	<del>BAKALÁŘSKÁ</del> Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Problematika oprav svařovaných spojů za použití metody HFMI	

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKM	ROK ODEVZD.	2024
---------	---------	---------	-----	-------------	------

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	67	TEXTOVÁ ČÁST	54	GRAFICKÁ ČÁST	0
--------	----	--------------	----	---------------	---

<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</b> <b>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	Diplomová práce se zabývá problematikou oprav svařovaných spojů za použití metody HFMI. V teoretické části se zaměřuje na popsání životnosti svařovaných spojů a metody HFMI. V praktické části se ověřuje možnost opravy únavové trhliny a ověřuje se hypotéza, podle které by měl opravený svařovaný spoj mít vyšší provozní pevnost, než měl spoj před opravou.
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> <b>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</b>	Životnost svarového spoje, metoda High-Frequency Mechanical Impact, únavové zkoušky, únavové trhliny, oprava trhlín

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

<b>AUTHOR</b>	<b>Surname</b> Kepka	<b>Name</b> Jiří	
<b>STUDY PROGRAMME</b>	N0715A270014 Materials Science and Manufacturing Technology		
<b>SUPERVISOR</b>	<b>Surname (Inclusive of Degrees)</b> Ing. Kepka, Ph.D.	<b>Name</b> Miloslav	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KKM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	The issue of repairing welded joints using the HFMI method		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	KMM	<b>SUBMITTED IN</b>	2024
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	67	<b>TEXT PART</b>	54	<b>GRAPHICAL PART</b>	0
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

<b>BRIEF DESCRIPTION</b> <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	The diploma thesis deals with the issue of repairing welded joints using the HFMI method. In the theoretical part, it focuses on describing the service life of welded joints and the HFMI method. In the practical part, the possibility of repairing a fatigue crack is verified and the hypothesis is verified, according to which the repaired welded joint should have a higher operational strength than the joint before the repair.
<b>KEY WORDS</b>	Lifespan of welded joints, High-Frequency Mechanical Impact method, fatigue tests, fatigue cracks, crack repair

## Obsah

1	Úvod.....	13
2	Životnost svarového spoje.....	14
2.1	Metody hodnocení.....	14
2.2	Únava materiálů .....	14
2.2.1	Wöhlerova křivka .....	15
3	Únavové zatížení.....	17
3.1	Hodnocení svaru dle použitého napětí .....	18
3.1.1	Nominální napětí.....	18
3.1.2	Efektivní vrubové napětí.....	18
3.1.3	Strukturální hot spot napětí.....	19
4	Principy metody High-Frequency Mechanical Impact (HFMI).....	21
4.1	High-Frequency Mechanical Impact (HFMI) .....	21
4.2	HFMI zařízení .....	21
4.3	Příprava svaru.....	23
4.4	Ošetřování svaru.....	25
4.5	Vyhodnocování měření.....	26
4.6	Zlepšení únavové životnosti použitím HFMI.....	27
5	Detekce trhlin .....	29
5.1	Vizuální kontrola .....	29
5.2	Kapilární zkouška.....	30
5.2.1	Postup zkoušky .....	30
5.3	Magnetická prášková metoda.....	31
5.3.1	Postup metody.....	31
6	Předchozí studie metody HFMI .....	33
6.1	Zlepšení únavové pevnosti vysokopevné a hliníkové svařované konstrukce .....	33
6.1.1	Princip zkoušky .....	33
6.1.2	Výsledky studie .....	34
6.2	Účinek HMFMI na vysokopevnou ocel.....	35
6.2.1	Princip zkoušky .....	35
6.2.2	Výsledky zkoušky .....	36
6.3	Zvyšování únavové životnosti svarů vysokopevnostních ocelí metodou HFMI .....	37
6.3.1	Princip zkoušky .....	37
6.3.2	Výsledky zkoušek.....	38

7	Použití HFMI na mostních konstrukcích .....	39
7.1	Praktická aplikace – most přes Schenkendorfstrasse v Mnichově.....	39
7.2	Most v Mülheimu .....	40
8	Experimentální část .....	43
8.1	Materiál .....	43
8.2	Zařízení pro únavové zkoušky .....	44
8.3	Experimentální vzorky .....	45
8.3.1	<i>Svařovací parametry</i> .....	47
9	Únavové zkoušky .....	48
9.1	Kalibrace kritéria pro vznik makroskopické trhliny .....	48
9.2	Vyhodnocení prvních únavových zkoušek.....	49
9.3	Oprava trhlin .....	50
9.3.1	<i>Aplikace HFMI</i> .....	52
9.4	Vyhodnocení druhé únavové zkoušky .....	54
9.5	Dolomení vzorků.....	56
9.5.1	<i>Vzorek 6</i> .....	56
9.5.2	<i>Vzorek 7</i> .....	57
9.5.3	<i>Vzorek 8</i> .....	58
9.5.4	<i>Shrnutí dolomených vzorků</i> .....	59
10	Zbytkové napětí.....	59
10.1	Zkoumaný vzorek.....	59
10.1.1	<i>Parametry a experimentální uspořádání</i> .....	60
10.1.2	<i>Naměřené hodnoty</i> .....	60
10.2	Vzorek s aplikací HFMI .....	61
10.3	Naměřené hodnoty .....	62
11	Diskuse výsledků.....	63
12	Závěr.....	65
13	Zdroje .....	66



## Přehled použitých zkratk

HFMI – Vysokofrekvenční mechanický dopad či kování (angl. High-Frequency Mechanical Impact)

FAT – Od slova Fatigue Strength. Udává únavovou pevnost svaru pro životnost 2 miliony cyklů.

MKP – Metoda konečných prvků

IIW – Mezinárodní institut pro svařování (angl. International Institute of Welding)

TIG – Svařovací metoda netavící se wolframovou elektrodou

MAG – Metoda svařování kovů v ochranné atmosféře aktivního plynu.

UIT – Ultrasonic impact treatment

UP – Ultrasonic peening

UPT – Ultrasonic peening treatment

HiFIT – zařízení pro aplikaci HFMI od společnosti DYNATEC Gesellschaft für CAE und Dynamik mbH

PIT – Pneumatic impact treatment

UNP – Ultrasonic needle peening

RTI – Regionální technologický institut

NDT – Nedestruktivní testování

AW – pouze svařené (as welded)

## Přehled použitých veličin a symbolů

Veličina	Jednotky	Název
$f$	[Hz]	Frekvence
$\sigma$	[MPa]	Napětí
$\sigma_a$	[MPa]	Amplituda napětí
$\sigma_m$	[MPa]	Rozkmit napětí
$\sigma_c$	[MPa]	Mez únavy
$\Delta\sigma$	[MPa]	Rozkmit napětí
$N_c$	[-]	Počet cyklů do lomu
R	[-]	Asymetrie cyklu
s	[-]	Směrodatná odchylka
d	[-]	Počet směrodatných odchylek
$\phi$	[°]	Úhel naklonění nástroje
$\psi$	[°]	Úhel posuvu nástroje

## Seznam obrázků

Obrázek 1: S-N křivky únavové odolnosti pro oceli a její svary [1].....	15
Obrázek 2: Rozdělní Wöhlerovy křivky [4].....	16
Obrázek 3: Definice pro únavový cyklus [23] .....	17
Obrázek 4: Vliv součinitele nesymetrie cyklu na únavu [24] .....	17
Obrázek 5: Fiktivní zaoblení svaru [1].....	19
Obrázek 6: Definice strukturálního hot spot napětí [1].....	19
Obrázek 7: Doporučená rozložení tenzometrů pro hot-spot místa [1].....	20
Obrázek 8: Používané indentory [5].....	22
Obrázek 9: Pneumatická pistole pro HiFIT [8].....	22
Obrázek 10: Nástroj pro technologii UIT [9].....	23
Obrázek 11: Mezní hodnoty vad dle ISO 5817 [7] .....	24
Obrázek 12: Možný vznik trhliny při špatném použití HFMI [5].....	24
Obrázek 13: Ukázka úhlu naklonění a úhlu posuvu nástroje [5] .....	25
Obrázek 14: Nedostatečně opracovaný svarový spoj [5] .....	26
Obrázek 15: A) Správný profil drážky po HFMI B) Špatný profil drážky po HFMI s vadou připomínající trhlínu [5] .....	26
Obrázek 16: Měření rozměry po aplikaci HFMI [5] .....	27
Obrázek 17: Svary vhodné k aplikaci HFMI [5].....	27
Obrázek 18: Nevhodné svary k opracování HFMI [5].....	28
Obrázek 19: Princip fungování metody [13].....	31
Obrázek 20: Elektromagnet jho; rozměry jsou uvedeny v mm [12] .....	32
Obrázek 21: Rozměry vzorku a zkušební zařízení [14] .....	33
Obrázek 22: Zbytkové napětí poblíž povrchu [14] .....	34
Obrázek 23: Geometrie vzorku [15].....	35
Obrázek 24: Výsledky únavových zkoušek T-spojů ve stavu bez a s použitím HFMI a porovnání s návrhovou křivkou třídy FAT 225 z doporučení IIW [15].....	36
Obrázek 25: Přehled označení míst na patě svaru [15] .....	36
Obrázek 26: Wöhlerova křivka pro ocel S460MC [16] .....	38
Obrázek 27: Most přes Schenkendorfstrasse [20].....	39
Obrázek 28: Přehled upravených částí v mostě [19].....	40
Obrázek 29: Most přes řeku Ruhr v Mülheimu [19].....	40
Obrázek 30: Připevnění podélného nosníku [19].....	41
Obrázek 31: Zařízení pro únavové zkoušky.....	44
Obrázek 32: Rozměry vzorku .....	45

Obrázek 33: Svařovací přípravek, heftování a první souvislý svar.....	45
Obrázek 34: Celkový svařenec a detail svarové housenky .....	46
Obrázek 35: Řezání svařence na pásové pile .....	46
Obrázek 36: Zkoumané vzorky pro určení hodnoty ohnutí .....	48
Obrázek 37: Wöhlerova křivka pro první únavovou zkoušku .....	50
Obrázek 38: Detekce trhliny pomocí kapilární zkoušky .....	50
Obrázek 39: Broušení trhliny .....	51
Obrázek 40 Náběhové a výběhové hrany společně s kořenovou vrstvou: .....	51
Obrázek 41: Aplikace HFMI na očištěný svar .....	52
Obrázek 42: Znázornění rozmezí úhlů [21] .....	52
Obrázek 43: Kontrola hrotu pomocí měřidla [21].....	53
Obrázek 44: Kontrola měrkou; vlevo 0,20 mm; vpravo 0,35 mm [21].....	53
Obrázek 45: S-N diagram všech únavových zkoušek.....	55
Obrázek 46: Šířka únavové trhliny.....	56
Obrázek 47: Hloubka únavové trhliny .....	56
Obrázek 48: Šířka únavové trhliny.....	57
Obrázek 49: Hloubka únavové trhliny .....	57
Obrázek 50: Šířka únavové trhliny.....	58
Obrázek 51: Hloubka únavové trhliny .....	58
Obrázek 52: Analyzovaná deska, značení směrů a analyzovaných oblastí.....	59
Obrázek 53: Grafických průběh zbytkového napětí a grafický průběh hodnot parametru FWHM [22] .....	61
Obrázek 54: Grafických průběh zbytkového napětí a grafický průběh hodnot parametru FWHM [22] .....	62
Obrázek 55: Porovnání výsledků experimentů .....	64

## Seznam tabulek

Tabulka 1: Porovnání parametrů pro dvě rozdílné metody [5] .....	25
Tabulka 2: Výsledky studie [14] .....	34
Tabulka 3: Svařovací parametry [16] .....	37
Tabulka 4: Parametry únavových zkoušek ocel S460MC [16] .....	38
Tabulka 5: Chemické složení oceli v % [17] .....	43
Tabulka 6: Mechanické vlastnosti oceli [17] .....	43
Tabulka 7: Svařovací parametry .....	47
Tabulka 8: Chemické složení a mechanické vlastnosti drátu G4Si1 [18] .....	47
Tabulka 9: První únavové zkoušky .....	49
Tabulka 10: Výsledky a parametry druhé únavové zkoušky .....	54
Tabulka 11: Hodnoty makroskopických zbytkových napětí a parametrů [22] .....	60
Tabulka 12: Hodnoty makroskopických zbytkových napětí a parametrů [22] .....	62

# 1 Úvod

Svařování je nenahraditelný proces v oblasti konstrukcí. Mohou díky němu vznikat konstrukce složitých tvarů za použití různých materiálů. Tyto konstrukce jsou poté provozně zatěžovány například statickým a dynamickým namáháním, nebo i působením okolního prostředí. Samotné svary jsou právě místem, kde mohou nejčastěji objevit únavové trhliny, právě díky působení časově proměnlivého zatěžování. To je ovšem vada, která může vést k selhání funkčnosti konstrukce a je jí nutno opravit.

Cílem práce je ověřit možnost opravy únavové trhliny s využitím metody HFMI (High-Frequency Mechanical Impact), která je po vybroušení trhliny a zavaření aplikována. Je to rychlá a jednoduchá metoda, která vnáší tlakové napětí do paty svaru, což je hranice mezi základním materiálem a svarem a způsobuje tak zvýšení únavové životnosti. Zkoumaná hypotéza je, že opravený svařovaný spoj bude mít vyšší provozní pevnost, než měl spoj před opravou.

K ověření hypotézy bude proveden experiment, při kterém dojde nakmitání makroskopické trhliny na zvolených zatěžovacích hladinách. Následně se trhlina opraví, oklepe a na stejné zatěžovací hladině provede zkouška znova. Tento způsob opravy bude porovnán s opravou zavařením bez využití HFMI. Podle hypotézy by měl mít opravený vzorek větší životnost než neopravený. Pokud se zkoumaná hypotéza potvrdí, mohla by se metoda HFMI aplikovat například na starší mostní konstrukce, kde už trhliny vznikly<sup>1</sup>. Na zkušebních vzorcích se také provede měření zbytkového pnutí před a po aplikaci metody HFMI.

Teoretická část práce se zabývá životností svarových spojů. V úvodu popisuje problematiku únavy se zaměřením na únavu svařovaných spojů. V následující kapitole je popsána metoda HFMI a její principy. Dále jsou uvedeny a srovnány další používané metody, způsoby vyhodnocení a základní parametry. Následující kapitola se zaměřuje na způsoby, jakými lze detekovat trhlinu. Zmiňuje nedestruktivní testování a popisuje tři metody, které budou použity v experimentální části pro detekci trhliny. V poslední kapitole jsou uvedeny tři studie, které se zabývaly podobnou tematikou a poslouží jako inspirace pro zpracování a porovnání získaných výsledků.

Práce volně navazuje na výzkum, který dělal v rámci diplomové práce Ing. Bořek Ozom ve spolupráci s katedrou KMM na ZČU a laboratoří ZPZ.

---

<sup>1</sup> Práce je financovaná v rámci projektu s ČVUT fakultou stavební, která se zabývá zvyšováním únavové odolnosti pro mosty. <https://starfos.tacr.cz/projekty/CK03000162#project-main>

## 2 Životnost svarového spoje

Všechny svařované spoje, které podléhají proměnlivému zatěžování a hrozí v případě poruchy lidské nebo materiální škody, by měly být posuzovány na únavovou životnost. Většina selhání svařovaných konstrukcí je způsobena právě únavovým namáháním. Hlavní příčinou tohoto selhání je, že pevnost materiálů při cyklickém namáhání je mnohem nižší než pevnost při statickém zatěžování. Únava materiálu je postupné nevratné poškození při opakovaném mechanickém, tepelném nebo mechanicko-tepelném namáhání. Dochází k němu při zatěžování součástí vnějšími silami, které v nich vyvolávají napětí nepřevyšující hodnoty přípustné při jejich statickém zatěžování. Únava následně vede ke změnám vlastností materiálu s následným vznikem a růstem trhlin, což může způsobit až porušení materiálu. Počet cyklů do poruchy závisí na mechanických vlastnostech materiálu a druhu zatížení, ale také i na ostatních faktorech, jakými jsou zbytková napětí, druh materiálu, nespojitosti, teploty, geometrie, povrchové úpravy nebo přítomnost koroze.

### 2.1 Metody hodnocení

Únava materiálu lze hodnotit podle normy ČSN EN 1993-1-9 (Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-9: Únava). Hodnocení únavy materiálu je založeno na jedné z metod:

- metoda přípustných poškození;
- metoda bezpečné životnosti.

Metoda přípustných poškození zajišťuje, že konstrukce bude uspokojivě sloužit po dobu navržené životnosti za předpokladu, že v průběhu jejího působení je zaručen systém kontrol a údržba pro zjištění a případnou úpravu únavového působení.

V druhém případě metoda bezpečné životnosti zajišťuje, že konstrukce bude uspokojivě sloužit po dobu navržené životnosti bez potřeby provozních kontrol. Uplatňuje se v případech, kdy vznik lokální trhliny v jedné části může rychle vést k porušení celé konstrukce. [2]

### 2.2 Únava materiálů

Únavu materiálu je možné popsat mnoha způsoby. Tím nejpoužívanějším způsobem je použití Wöhlerovy křivky, která se také uvádí jako únavová křivka, nebo také jako S-N křivka. Graficky vyznačuje vztah mezi amplitudou napětí a počtem cyklů do lomu. Pomocí laboratorních měření se získává mez únavy, která udává nejvyšší amplitudu napětí, při kterém materiál vydrží nekonečný počet cyklů bez porušení. [1]

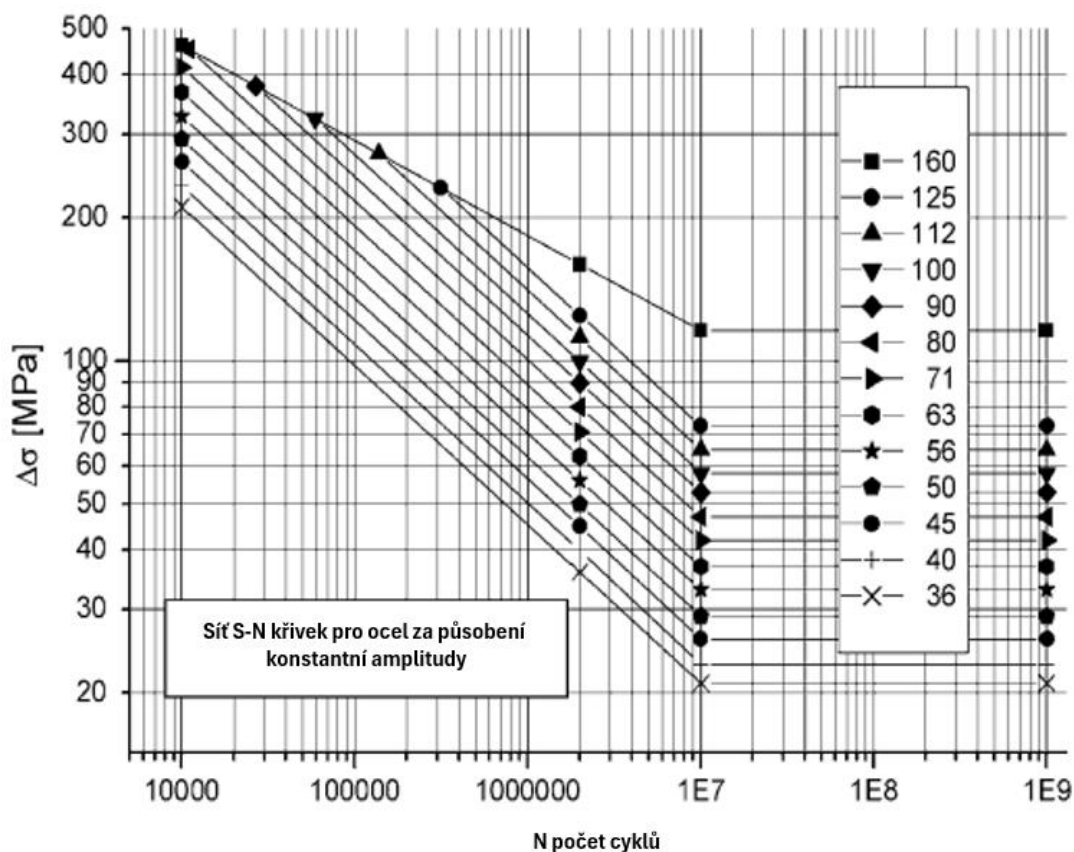
Při vytváření únavové křivky je třeba zahrnout i ostatní účinky, například:

- koncentraci napětí v místě svaru;
- koncentraci napětí v důsledků geometrie svaru;
- kvalitou svaru;
- směr zatížení;
- vysoká zbytková pnutí;
- svařovací proces.

### 2.2.1 Wöhlerova křivka

Wöhlerova křivka popisuje závislost napětí  $\sigma$  na počtu cyklů do poruchy  $N$ . Ukázka Wöhlerovy křivky je na Obrázcích 1 a 2. Na vodorovné ose je vyneseno počet cyklů a na svislé ose je hodnota amplitudy či rozkmit napětí. Na obrázcích jsou zobrazeny křivky pro ocel. To lze určit podle změny tvaru křivky, kdy je při určité hodnotě amplitudy dosaženo meze únavy materiálu. Ta rozděluje diagram na časovanou únavovou pevnost a trvalou únavovou pevnost. Mez únavy u ocelí se obvykle stanovuje při  $10^6$  až  $10^7$  cyklech. [1, 5]

V normě ČSN EN 1993-1-9 je každá křivka únavové životnosti je popsána dvěma parametry, a to sklonem šikmé větve a provozní pevností (uvedena v MPa) ve 2 milionech cyklech. Tato hodnota je označena jako třída únavy FAT (od slova Fatigue Strength), viz Obrázek 1.

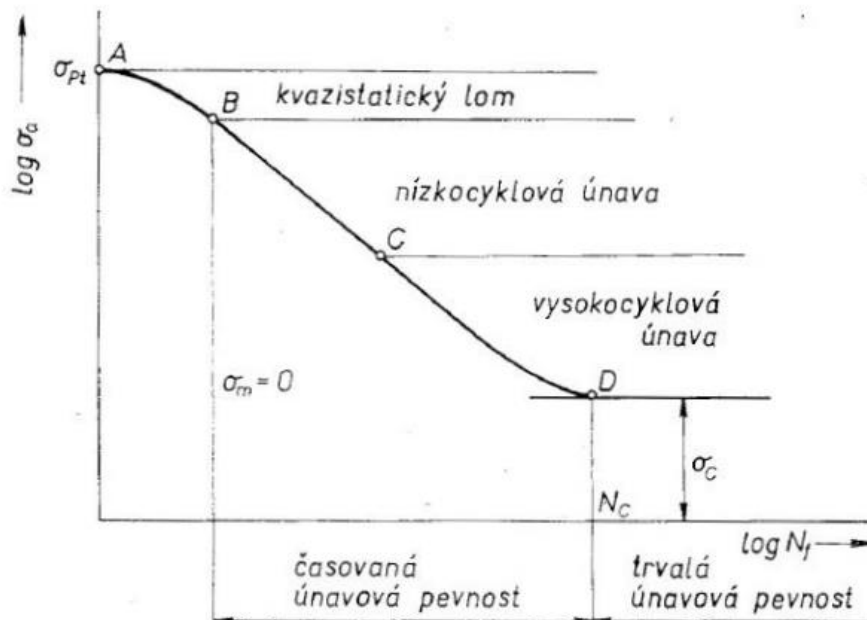


Obrázek 1: S-N křivky únavové odolnosti pro oceli a její svary [1]

Při stanovení šikmé větve S-N křivky ze zkušebních dat je běžně uplatňována metoda lineární regrese na logaritmicky transformovaná data, což umožňuje efektivní analýzu naměřených údajů z únavových testů. Lineární regrese zde slouží k nalezení optimální přímky, která nejlépe aproximuje experimentální data, a tím poskytuje základ pro predikci únavové životnosti materiálů.

Na Obrázku 2 je znázornění rozdělení únavové křivky na 3 oblasti:

- První oblastí je oblast kvazistatického lomu, ve které dochází k porušení vzorku už při prvních kmitech. Hodnota amplitudy napětí se blíží k mezi pevnosti  $R_m$  a k lomu dochází při několika málo cyklech  $N_C$  ( $-\frac{1}{4} < N_C < 10^2$ ). Lom z této oblasti není únavovým lomem, má znaky tvárného lomu. [3, 4]
- Druhá oblast se nachází mezi  $10^2$  až  $10^5$  počtu cyklů. Označuje se za oblast nízkocyklové únavy, ve kterém je vzorek namáhán napětím přesahující mez kluzu. Jsou zde přítomné plastické deformace materiálu v makroobjemu a do lomu stačí malý počet cyklů. [3, 4]
- Poslední oblastí je oblast vysokocyklové únavy. Odpovídá pro ni ohraničení počtu cyklů od  $10^5$  do  $10^7$ . Materiál je zde namáhán menším napětím, než je mez kluzu. Hodnoty amplitudy napětí jsou už natolik nízké a k plastické deformaci dochází jen v mikroobjemu. Lom z této oblasti se vyznačuje hladkou plochou s postupovými čárami a striacemi. [3, 4]



Obrázek 2: Rozdělní Wöhlerovy křivky [4]



### 3 Únavové zatížení

Posuzování únavy většinou probíhá při harmonickém zatěžování s konstantní amplitudou. Pro zatížení se nejčastěji počítá s rozkmitem napětí:

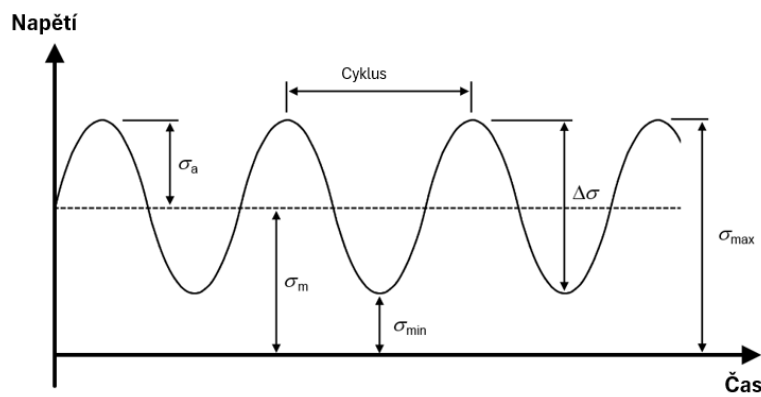
$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min} .$$

Dále se pak dají dopočítat o ostatní hodnoty:

$$\text{střední napětí: } \sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2};$$

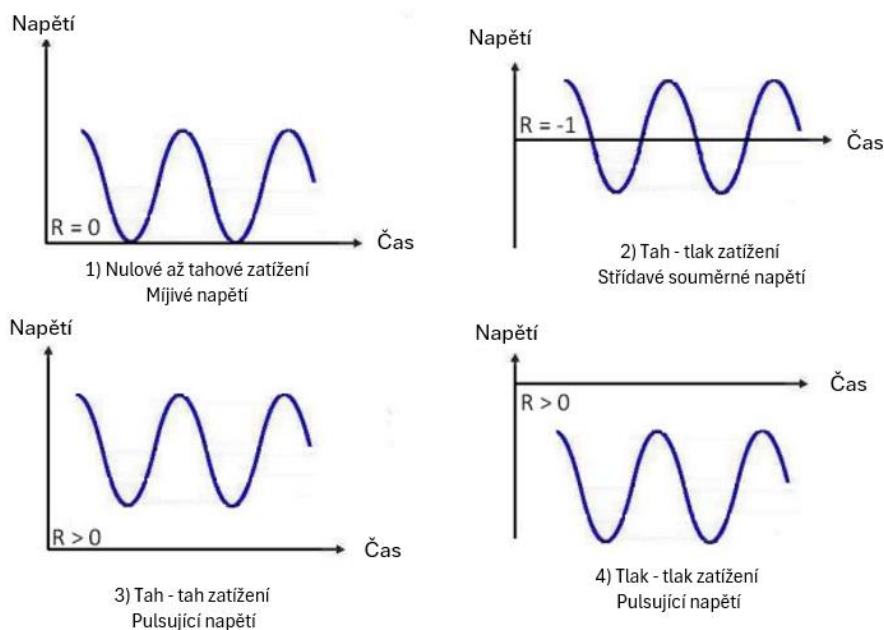
$$\text{amplituda napětí: } \sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2};$$

$$\text{součinitel nesymetrie cyklu: } R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}.$$



Obrázek 3: Definice pro únavový cyklus [23]

Hlavním parametrem ovlivňující únavovou životnost je velikost rozkmitu napětí. Společně s ním má velký vliv i součinitel nesymetrie cyklu R. Na Obrázku 4 jsou zobrazeny průběhy pro jednotlivé hodnoty R a druhy zatížení. Při stejném rozsahu napětí je míra únavového poškození následující: 3) > 1) > 2) > 4). Největší poškození způsobeno při zatížení tah – tah (3). [24]



Obrázek 4: Vliv součinitele nesymetrie cyklu na únavu [24]

### 3.1 Hodnocení svaru dle použitého napětí

Podle různých metod analýzy napětí se při únavové analýze svařovaných konstrukcí obvykle používají hlavně tři přístupy vycházející použitého napětí:

- nominální napětí;
- efektivní vrubové napětí;
- strukturální hot spot napětí.

#### 3.1.1 Nominální napětí

Nominální napětí je napětí vypočítané pro daný uvažovaný průřez, ovšem bez zahrnutí lokálního nárůstu napětí vlivem svarového spoje. Nominální napětí však počítá se zvýšením napětí vlivem geometrických nepřesností v blízkosti svarového spoje, jako jsou různé výřezy, nebo hrany. Vlivy svarového spoje (zbytkové napětí, geometrie svaru, svarové nedokonalosti) jsou zahrnuty v únavových FAT křivkách nižších tříd. [1, 24]

Nominální napětí lze určit analyticky jak v patě svaru, tak i v kořeni svaru, nebo pomocí MKP (metoda konečných prvků). Průměrné napětí v patě a kořeni svaru lze snadno dohledat v příslušných tabulkách či doporučeních. Případné výchytky (například výchytky v axiálním směru) by měly být započteny při výpočtu. [1, 24]

Pro tupé svary se používá tloušťka stěny materiálu pro výpočet. V případě dvou materiálů s rozdílnou tloušťkou se počítá nejmenší tloušťka.

U koutového svaru se počítá s nejmenší vzdáleností od kořene, tedy s výškou svaru.

Napětí se následně spočítá podle:

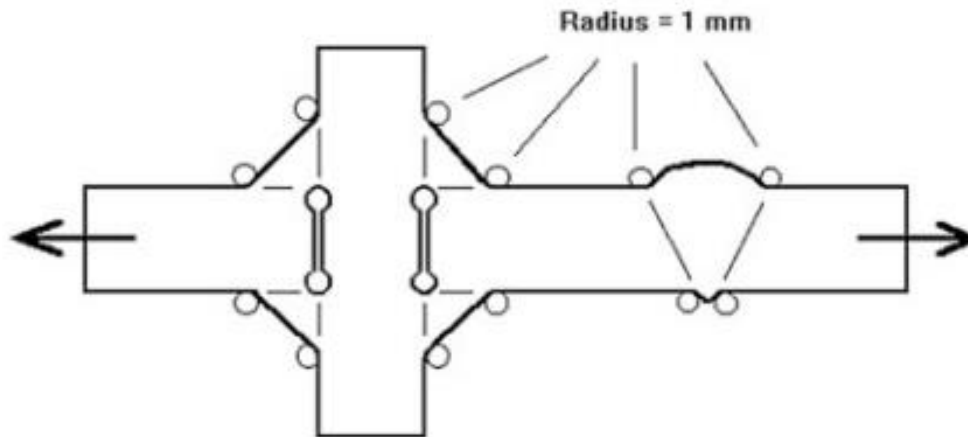
$$\sigma_w \text{ nebo } \tau_w = \frac{F}{a * l}$$

Kde  $a$  je šířka svaru,  $l$  je délka svaru a  $F$  je působící síla.

V jiných případech lze použít metodu konečných prvků. Ta se používá pro složitější svarové konstrukce, nebo pro konstrukce která obsahují mnoho geometrických nepřesností a není pro ně k dispozici analytické řešení. [1, 24]

#### 3.1.2 Efektivní vrubové napětí

Efektivní vrubové napětí je celkové napětí v kořeni vrubu, které se získává za předpokladu lineárně elastického chování materiálu. Použití tohoto přístupu závisí na tloušťce plechu a na poloměru kořene vrubu. Tloušťka plechu musí být minimálně 5 mm, protože dosud nebyla ověřena pro menší tloušťky. Při zhodnocení se berou v potaz různé variace tvarových parametrů svaru a nelineární chování materiálu v kořeni v rubu. Z toho důvodu je skutečný obrys svaru nahrazen efektivním poloměrem vrubu 1 mm. Příklad je uveden na obrázku 5. Pro vyhodnocení únavy se efektivní vrubové napětí porovnává pouze s jedinou únavovou křivkou jedné třídy FAT. [1, 24]

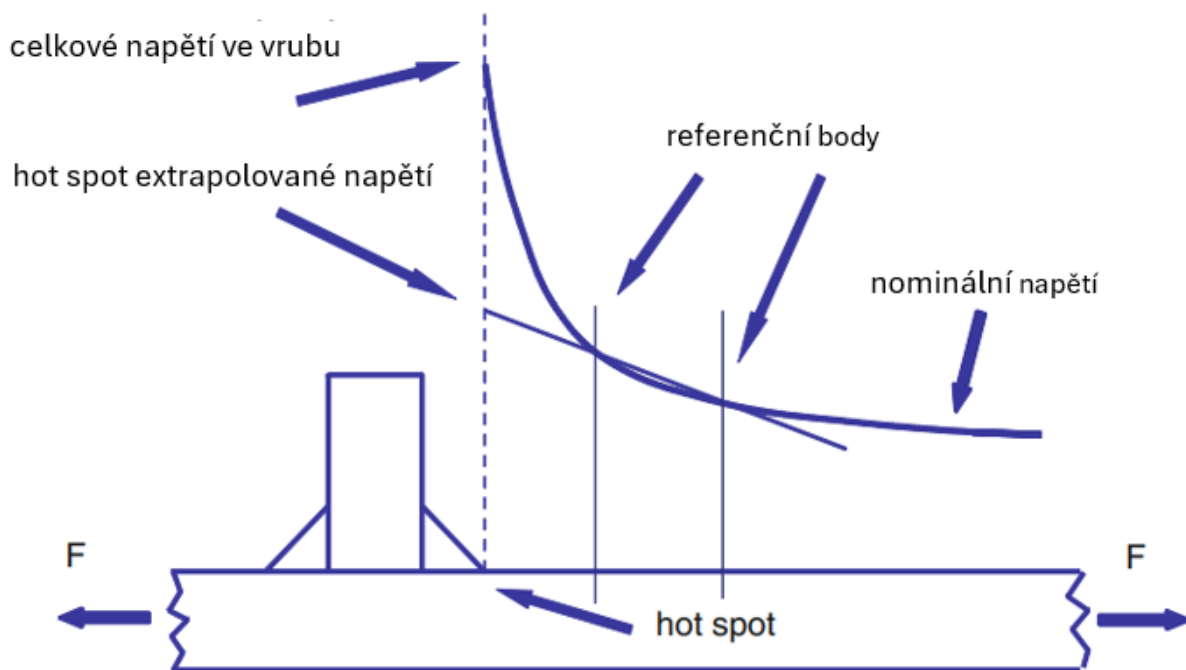


Obrázek 5: Fiktivní zaoblení svaru [1]

### 3.1.3 Strukturální hot spot napětí

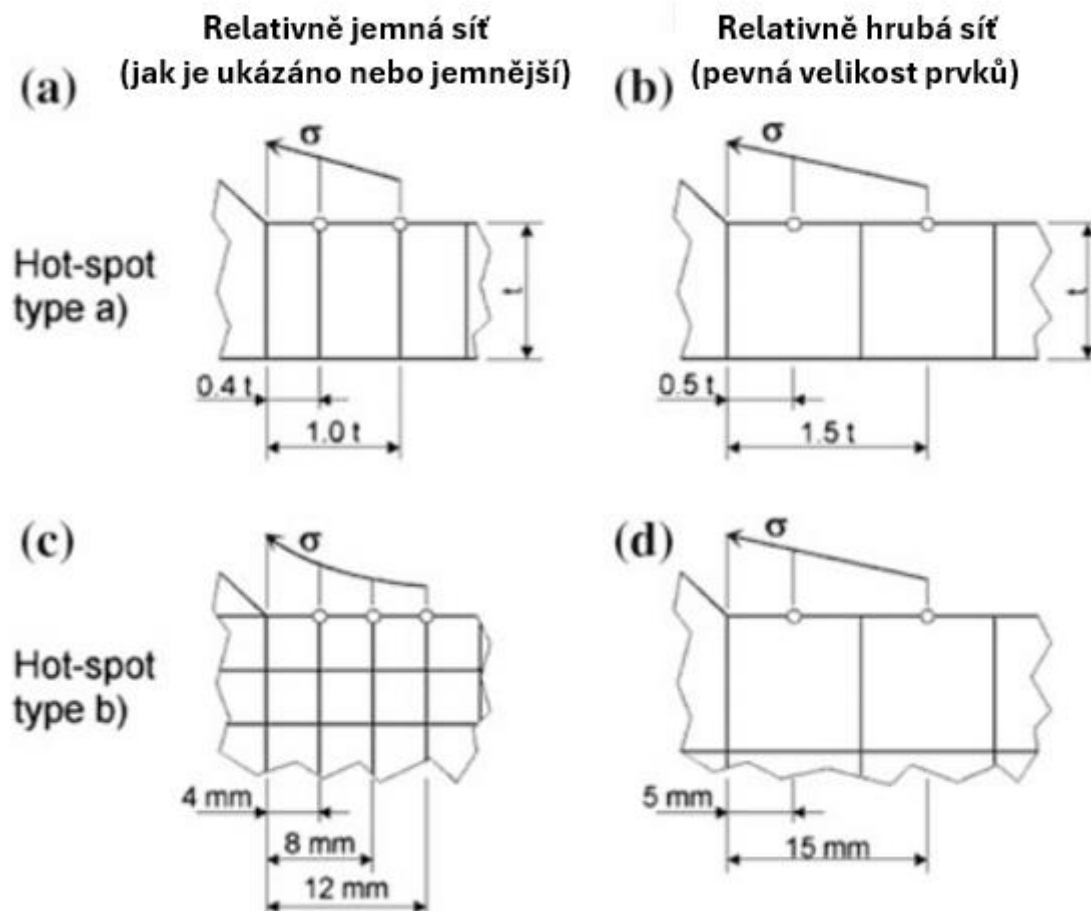
Tato metoda uvažuje s růstem napětí vlivem konstrukčních detailů v okolí svaru, ovšem nezahrnuje napětí způsobena geometrií svaru. Pojem hot-spot označuje patu svaru, kde se předpokládá iniciace únavové trhliny. Metodu nelze použít v případech, kde by se trhlina inicializovala například v kořeni svaru. Je vhodnou náhradou v případech, kdy není možné použít metodu nominálních napětí. [1]

Extrapolované jmenovité napětí se stanovuje experimentálně měřením tenzometry či MKP výpočtem. Referenční body na obrázku 6 zobrazují místa umístění tenzometrů. [1]



Obrázek 6: Definice strukturálního hot spot napětí [1]

Doporučené rozložení referenčních bodů podle IIW (Mezinárodní institut pro svařování) jsou zobrazeny na Obrázku 7. [1]



Obrázek 7: Doporučená rozložení tenzometrů pro hot-spot místa [1]

V praktické části bude použito umístění tenzometrů podle (a) na Obrázku 7. Mezinárodní pro svařování doporučuje pro výpočet extrapolovaného hot-spot napětí vzorec:

$$\sigma_{hs} = 1,67 \cdot \sigma_{0,4t} - 0,67 \cdot \sigma_{1,0t}$$

kde  $t$  je tloušťka plechu, napětí  $\sigma_{0,4t}$  a  $\sigma_{1,0t}$  jsou napětí změřená nebo spočítaná ve vzdálenosti  $0,4t$  a  $1,0t$  od paty svaru. [1]

Získaná hodnota hot-spot napětí poslouží pro převod síly na napětí, které je potřeba znát pro sestavení únavových křivek. Experimentálně byla zjištěna hodnota pro hot-spot napětí 50 MPa. Tedy výška beranu byla nakonfigurována tak, že 1 kN odpovídá 50 MPa hot-spot extrapolovanému napětí v patě svaru. [1]

## 4 Principy metody High-Frequency Mechanical Impact (HFMI)

Na svařovaných konstrukcích jsou právě svary nejčastějším místem vzniku únavových trhlin, které vznikají působením provozního zatížení. Pro zvýšení únavové životnosti svarového spoje lze použít několik různých metod, kterými se docílí požadované zlepšení. Mezi takové metody se řadí právě metoda High-Frequency Mechanical Impact (dále HFMI), což se dá přeložit jako vysokofrekvenční mechanický dopad či kování. [5, 6]

Ostatní metody, které se používají pro zlepšení únavové životnosti fungují na podobném principu jako HFMI. Vnáší tlakové napětí do paty svaru, což je hranice mezi základním materiálem a svarem. Dochází k úpravě geometrii svaru a tím se zamezuje šíření a vznik únavových trhlin. Mezi kromě již zmíněné metody se řadí metoda kladívkování, kuličkování, válečkování a lze sem zařadit i převaření paty svaru pomocí TIG. Tyto metody patří do skupiny mechanických úprav. Ke zlepšení únavové životnosti po svařování lze použít tepelné zpracování v podobě žihání, nebo lokálního ohřevu. [5, 6]

### 4.1 High-Frequency Mechanical Impact (HFMI)

HFMI je používané označení pro několik technologií pracujících na podobném principu. Liší se ve zdrojích energie, některé používají ultrazvukové piezoelektrické prvky, nebo magnetostrikční prvky a stlačený vzduch. Základní princip všech metod zůstává stejný. Indentor válcového tvaru je urychlován proti součásti nebo konstrukci s vysokou frekvencí (přibližně 90 Hz). Pro kladný výsledek by se měla působící síla indentoru pohybovat v řadách kN. Opravovaný materiál je tak silně deformován a tím se dosahuje změn v mikrostruktuře, v lokální geometrii svaru a také změn ve zbytkovém napětí v místě opracování a v jeho nejbližším okolí. [5]

Jak bylo výše zmíněno, pojem HFMI je označení pro jednotlivé technologie podobného principu, mezi ně patří ultrasonic impact treatment (UIT), ultrasonic peening (UP), ultrasonic peening treatment (UPT), high frequency impact treatment (HiFiT), pneumatic impact treatment (PIT) a ultrasonic needle peening (UNP). [5]

### 4.2 HFMI zařízení

Zařízení pro metodu HFMI se skládají ze zdroje a nástroje. Jednotlivé metody HFMI sice fungují na stejném principu, ale jejich nástroje jsou přizpůsobeny potřebám technologie. Například ultrazvuková zařízení používají stlačený vzduch, nebo vodu k regulaci teploty nástroje, zatímco jiná zařízení jsou pneumatická.

Indentory jsou válcového tvaru vyrobené z vysokopevnostní oceli. Dochází k jejich opotřebení a proto vyžadují občas výměnu či opravu. Aby se dosáhlo kvalitního výsledku, mají indentory různé průměry a geometrie. Zároveň je možnost jejich konfigurace. Příklad používaných indentorů je na Obrázku 8. [5]



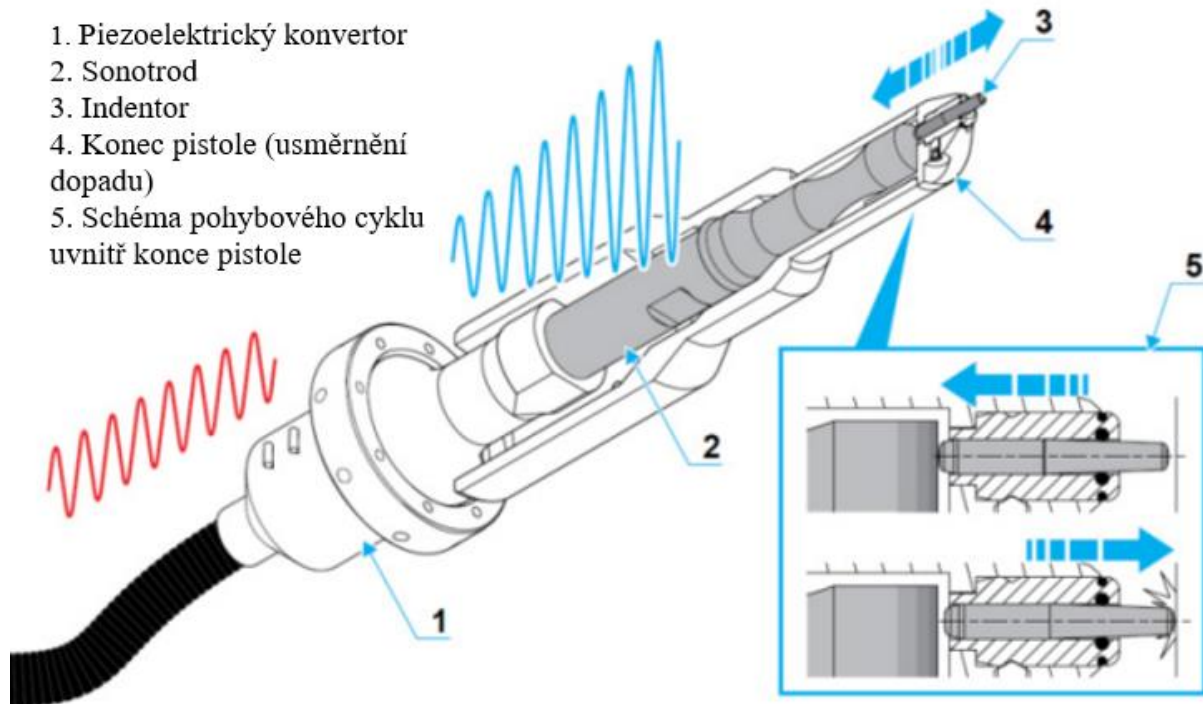
Obrázek 8: Používané indentory [5]

Ukázka nástroje pro metodu HFMI s komerčním názvem HiFIT, kterým je vybaveno pracoviště RTI na Západočeské univerzitě, je zobrazeno na Obrázku 9. Jedná se o pneumatický nástroj s vyměnitelným hrotem s možností nastavení intenzity. [8]



Obrázek 9: Pneumatická pistole pro HiFIT [8]

Pro srovnání je na Obrázku 10 uveden nástroj s popisem pro technologii Ultrasonic Impact Treatment (UIT). Nástroje se mírně liší vzhledově díky odlišnému zdroji. V tomto případě nástroj pracuje na principu ultrazvukových piezoelektrických prvků. [9]

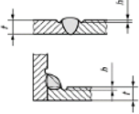
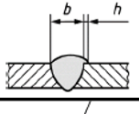
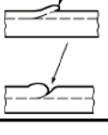


Obrázek 10: Nástroj pro technologii UIT [9]

### 4.3 Příprava svaru

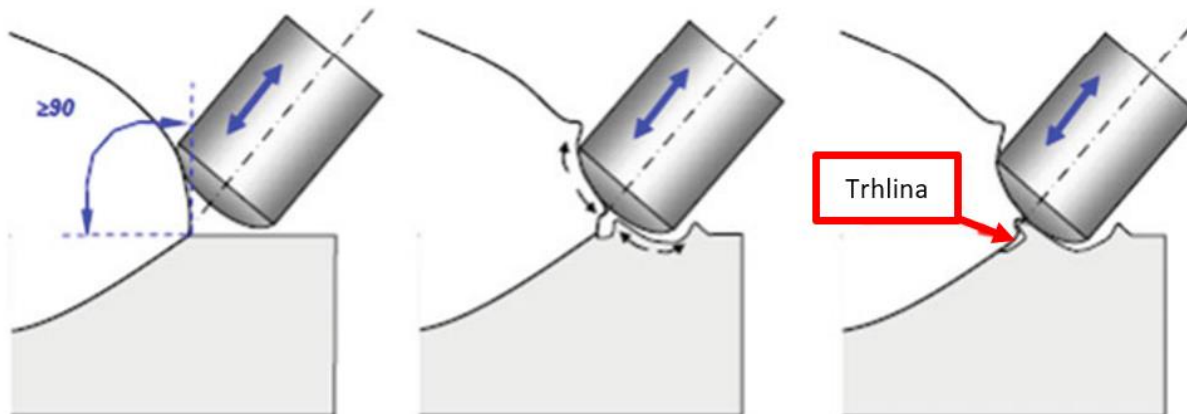
Před aplikací metody je nutné zbavit svarový spoj všech nečistot, které vznikly při svařování za pomoci broušení či kartáčování. Zhotovený svar by měl splňovat přijatelnou úroveň kvality s označením B, dle normy ISO 5817. Stupeň kvality B odpovídá nejvyššímu požadavku na kvalitu. Zhotovený svar však nemusí splňovat všechna kritéria z normy, stačí splňovat kritéria týkající se tvaru svaru. [7]

Mezi kritéria se řadí následující vady uvedeny na Obrázku 11. Pokud svar nesplňuje jedno či více kritérií, je doporučeno broušení. Musí se však vzít v potaz, že HFMI je nejúčinnější při působení na patu svaru, proto by mohlo při broušení dojít ke špatnému určení přesného místa paty svaru. [7]

Číslo	Referenční číslo podle ISO 6520-1	Název vady	Poznámky	t mm	Mezní hodnoty vad pro stupně kvality		
					D	C	B
1.7	5011	Souvislý zápal	Je požadovaný plynulý přechod. Nepovažuje se za systematickou vadu.	0,5 až 3	Krátké vady: $h \leq 0,2 t$	Krátké vady: $h \leq 0,1 t$	Nepřípustné
	5012	Nesouvislé zápaly (krátké vady)		> 3	$h \leq 0,2 t$ , ale max. 1 mm	$h \leq 0,1 t$ , ale max. 0,5 mm	$h \leq 0,05 t$ , ale max. 0,5 mm
1.10	503	Nadměrné převýšení koutového svaru	Je nutný plynulý přechod mezi svarovou housenkou a základním materiálem a/nebo přilehlou svarovou housenkou (housenkami)	$\geq 0,5$	$h \leq 0,25 b + 1$ mm, ale max. 5 mm	$h \leq 0,15 b + 1$ mm, ale max. 4 mm	$h \leq 0,1 b + 1$ mm, ale max. 3 mm
1.13	506	Přetečení		$\geq 0,5$	$h \leq 0,2 b$	Nepřípustné	Nepřípustné
1.19	517	Vadné napojení		$\geq 0,5$	Přípustné Mezní hodnota závisí na druhu vady způsobené napojením.	Nepřípustné	Nepřípustné

Obrázek 11: Mezní hodnoty vad dle ISO 5817 [7]

I přes nedodržení výše zmíněných kritérií může HFMI ošetřit svarový spoj, ale není zaručeno, že nezpůsobí nechtěné plastické deformace. Na Obrázku 12 je znázorněn případ špatné geometrie svaru s nevhodně zvoleným indetorem. V tomto případně se jedná o příliš velký úhel mezi základním materiálem a lícem svaru a za použití nevhodného indentoru vzniká trhlina mezi základním materiálem a svarem. [5]



Obrázek 12: Možný vznik trhliny při špatném použití HFMI [5]



## 4.4 Ošetřování svaru

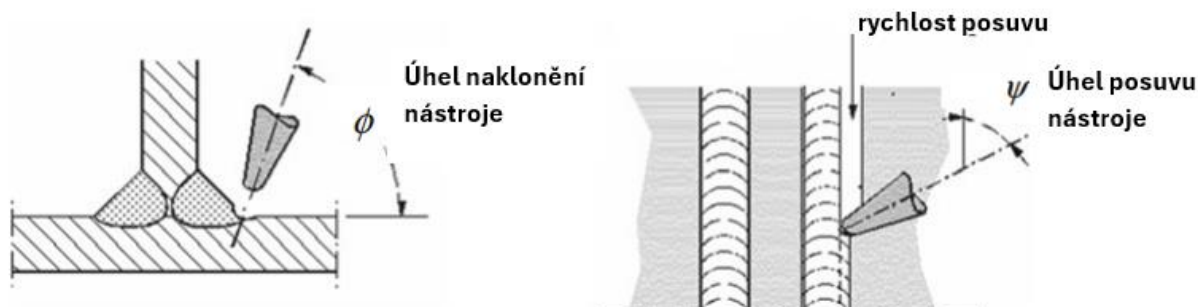
V přechodí podkapitole 4.1 bylo zmíněno několik metod HFMI fungujících na podobném principu. Jednotlivé postupy pro aplikaci na patu svaru se mohou lišit v závislosti na zvolené metodě. Pro srovnání je uvedeno v Tabulce 1 porovnání nastavení parametrů pro odlišené metody HiFIT a UIT. Metody se liší ve zdroji, v designu nástroje (viz kapitola 4.2) a indentoru.[5]

Při nadměrné či špatné aplikaci HFMI na patu svaru může dojít ke tvorbě trhliny. Ovšem i v případě příliš velkého či naopak malého použití v rámci zkoumaných parametrů stále vede k výraznému zlepšení životnosti proti únavovému namáhání. [5]

Tabulka 1: Porovnání parametrů pro dvě rozdílné metody [5]

Parametr	HFMI metoda	
	HiFIT – High frequency impact treatment	UIT – Ultrasonic impact treatment
Zdroj	Pneumatický	Ultrazvukový magnetostrikční
Počet indentorů	1	1-4
Úhel mezi osou indentoru a povrchem desky ( $\phi$ )	60° - 80°	30° - 80°
Úhel mezi osou indentoru a směrem posuvu ( $\psi$ )	70° - 90°	90° (všechny hroty indentoru by se měly dotýkat paty svaru)
Rychlost posuvu	3-5 mm/s	5-25 mm/s

Aplikace HFMI připomíná svými parametry a postupem svařovací proces. Jak je znázorněno na Obrázku 13, pracuje se podobně jako při svařování s úhlem naklonění nástroje, s rychlostí posuvu podél svaru a s úhlem posuvu nástroje. [5]



Obrázek 13: Ukázka úhlu naklonění a úhlu posuvu nástroje [5]

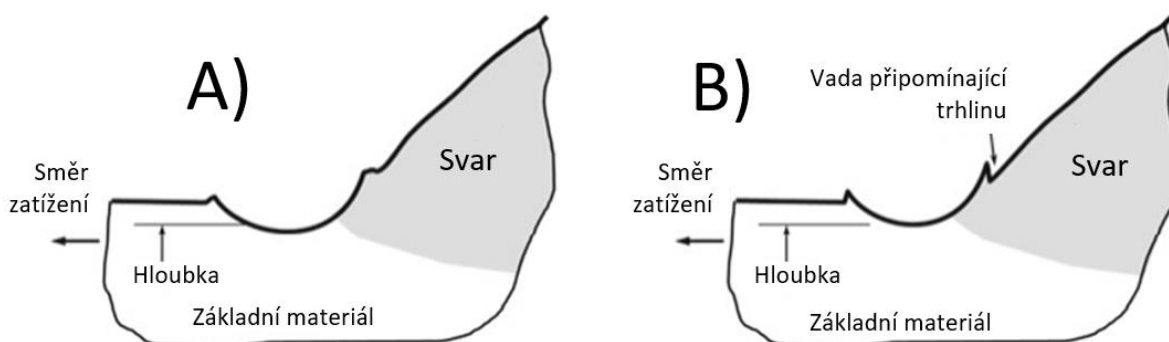
## 4.5 Vyhodnocování měření

Poté co je provedena HFMI metoda na svar následuje vyhodnocení a posouzení kvality aplikace. Vzniklá drážka odpovídá tvaru indentoru a měla by být hladká a lesklá po celé délce opracované plochy. K vyhodnocení se používá její hloubka, šířka a tvar. Zároveň by neměla ve vzniklé drážce být viditelná linie připomínající původní svarovou housenku, či linie připomínající prasklinu. Ta naznačuje, že svarový spoj nebyl dostatečně opracován viz Obrázek 14. Kromě vizuálních zkoušek se používají k ověření kvality drážky i nedestruktivní zkoušky jako je kapilární metoda, či magnetická metoda. Ty budou detailněji popsány v následujících kapitolách. [5]



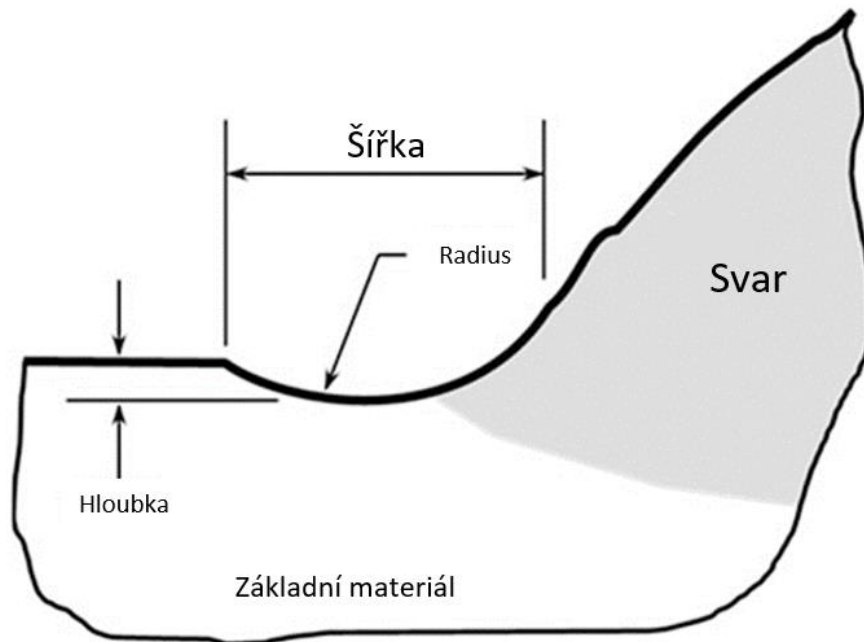
Obrázek 14: Nedostatečně opracovaný svarový spoj [5]

HFMI způsobuje na malé ploše studené tváření materiálu v blízkosti svaru. Kromě již výše zmíněné špatné volby indentoru, může dojít k další vadě, pokud se indentor nadměrně zaměřuje pouze na jednu oblast. Tím může dojít k plastickému posunu materiálu připomínající trhlinu, vada je zobrazena na Obrázku 15. Tato vada lze odstranit broušením a na poškozenou oblast lze znovu aplikovat HFMI. [5]



Obrázek 15: A) Správný profil drážky po HFMI B) Špatný profil drážky po HFMI s vadou připomínající trhlinu [5]

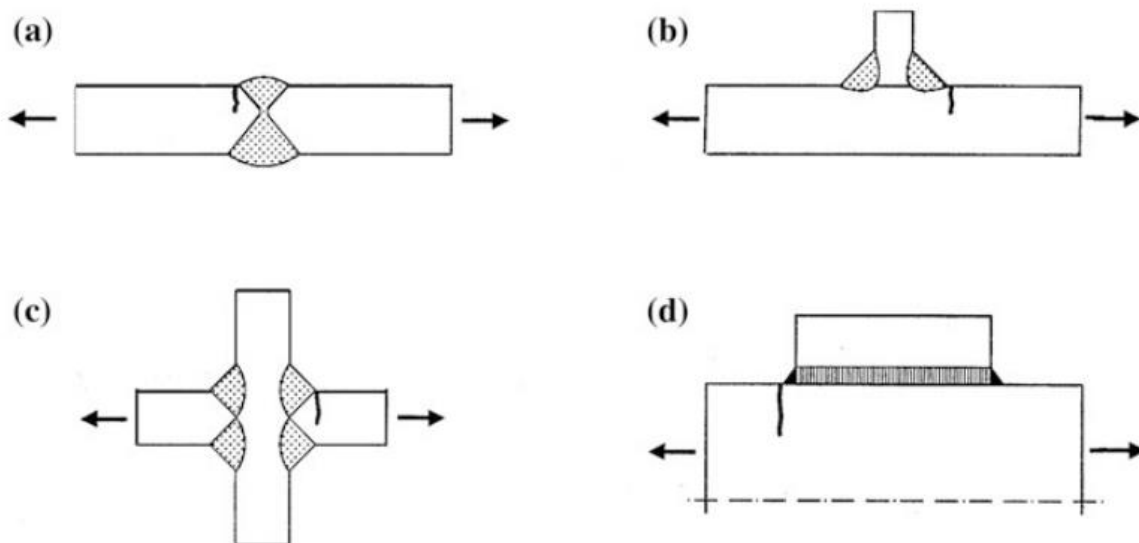
Na začátku podkapitoly bylo zmíněno že k měření se používá hloubka, šířka a tvar, respektive rádius vzniklé drážky. Aby se dosáhlo zvýšení únavové životnosti, musí být hloubka drážky minimálně 0,1 až 0,2 mm. Hloubku drážky ovšem může ovlivnit mez kluzu materiálu, nebo velikost zvoleného indentoru, obvykle však bývá 0,2 až 0,6 mm hluboká a 3 až 6 mm široká. Měřené rozměry jsou zobrazeny na Obrázku 16. Hloubku drážky lze poměrně snadno zkontrolovat pomocí jednoduchých hloubkoměrů, které jsou součástí vybavení zařízení. [5]



Obrázek 16: Měřené rozměry po aplikaci HFMI [5]

#### 4.6 Zlepšení únavové životnosti použitím HFMI

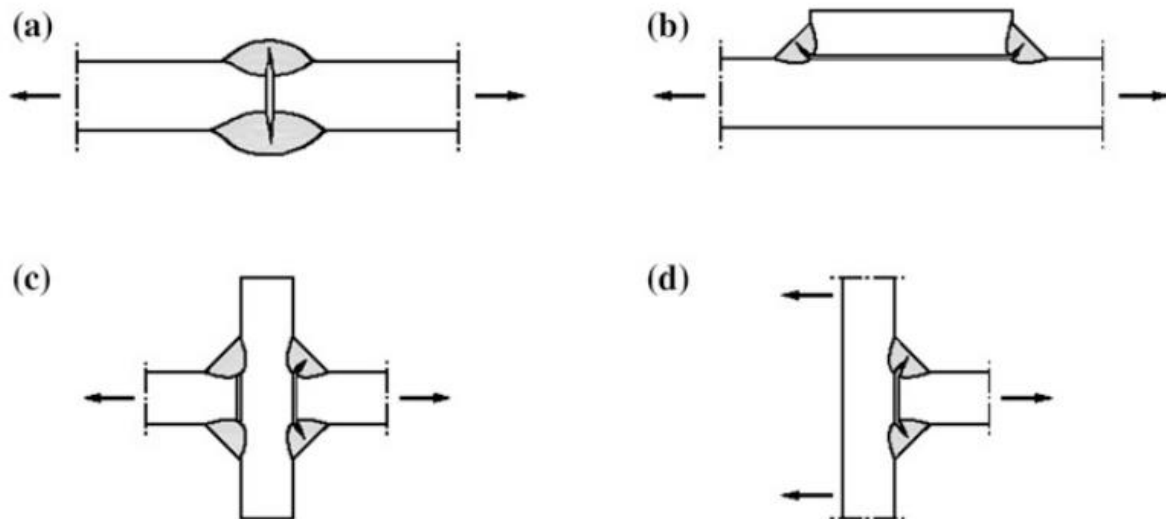
HFMI je možné aplikovat pouze na patu svaru a zvyšuje tak odolnost proti únavovým poruchám vycházející z tohoto místa. Typy svarů, které jsou vhodné pro použití HFMI jsou zobrazeny na Obrázku 17. [5]



Obrázek 17: Svary vhodné k aplikaci HFMI [5]

Na Obrázku 17 jsou znázorněny únavové trhliny u paty svaru, pokud ovšem dojde k přesunutí únavové trhliny z paty svaru do kořene svaru, nemusí dojít k výraznému zlepšení únavové životnosti. Svarové spoje, u kterých se šíří únavová trhlinka z kořene svaru a není pro ně vhodné použití HFMI jsou zobrazeny na Obrázku 18. [5]

Aby bylo zajištěno významné zvýšení únavové životnosti, měly by být svary (a), (c) a (d) více provařené do základního materiálu a svar (b) by měl mít větší tloušťku.



Obrázek 18: Nevhodné svary k opracování HFMI [5]

Životnost svarového spoje ovlivňuje i tloušťka základního materiálu. HFMI lze použít pro tloušťku základního materiálu od 5 mm. Velikost svaru a tloušťka základního materiálu ovlivňují koncentraci napětí na patě svaru a gradient napětí v základním materiálu. S rostoucí tloušťkou materiálu se zmenšuje únavová životnost spoje z důvodu větších zbytkových pnutí.[5]

## 5 Detekce trhlin

V rámci experimentální části bude vytvořena na svarovém spoji únavové trhlina. Pro její detekci a následného vyhodnocení se použijí nedestruktivní testy (zkráceně NDT). Jejich výhodou je možnost zkoumání svarů po výrobě bez ovlivnění těchto svarů. Zároveň umožňují identifikovat možné vady na svarových konstrukcích, které jsou již v provozu a je možné, že vlivem únavy materiálu se na nich vytvořila únavová trhlina.

Nedestruktivní testování můžeme rozdělit podle funkce přenosu metod na:

- Vizuelní kontrola
- Ultrazvukové zkoušení
- Zkoušení kapilární
- Magnetická metoda prášková
- Zkoušení vířivými proudy
- Radiografické zkoušení

V experimentální části se použije pro detekci povrchové trhliny vizuelní kontrola a kapilární zkoušení.

### 5.1 Vizuelní kontrola

Vizuelní kontrola patří mezi nejzákladnější nedestruktivní testy. Slouží k nalezení povrchových vad a nedokonalostí na výrobku, které vedou k dalším zkouškám. Pro správný průběh zkoušky je zapotřebí, aby pracovník, který zkoušku provádí neměl žádné zrakové vady, které by mohly ovlivnit vyhodnocení zkoušky. Před zkouškou se odstraní nečistoty, které vznikly při svařování, aby se zvýšila rozlišitelnost možných vad. Dalším faktorem, který má vliv na vyhodnocení zkoušky je osvětlení pracovního prostředí. Podle normy ČSN EN ISO 17637 by měla být intenzita osvětlení bílým světlem na povrchu minimálně 350 lx. [10]

Vizuelní kontrola se dělí na přímou a nepřímou. U přímé metody je podmínkou dostatečný přístup oka ve vzdálenosti 600 mm od kontrolovaného povrchu pod úhlem nepřesahující 30°. V případě že přístup není možný, například při kontrole malých dutin se využívají zrcátka, boroskopy nebo kamery. [10]

Výsledek zkoušky je ovlivněn viditelností a rozlišitelností detailu. V rámci svarových spojů se zkouška provádí před svařováním ke kontrole tvarů a případných výrobních nedostatků. Pokud je požadováno tak i při svařování, kdy probíhá kontrola housenek. A nakonec po svařování, při které se kontrolují dokončovací úpravy, čištění, profil a rozměry svaru, vady na povrchu svaru nebo v tepelně ovlivněných oblastech. [10]

## 5.2 Kapilární zkouška

Kapilární zkouška slouží ke zvýraznění povrchových vad, do kterých může proniknout detekční kapalina neboli penetrant. Je vhodná pro kontrolu všech materiálů, ovšem nesmí se použít na materiály, u kterých by došlo k narušení působením penetrantu. Metoda velmi dobře označuje plošné vady, jakými jsou například trhliny, studené spoje, póry a jiné vady svarových spojů. Z toho důvodu bude metoda použita v experimentální části pro detekci vzniklé únavové trhliny.

Před aplikací by měl být povrch dostatečně čistý a suchý. Na zkoušený povrch se nanáší penetrant, který proniká do možných povrchových vad. Penetrant působí určitou časovou dobu a poté dojde k odstranění jeho přebytku, následně dochází k nanesení vývojky. Vývojka absorbuje penetrant, který pronikl do povrchových vad a označují se tak zvýrazněné vady povrchu.[11]

### 5.2.1 Postup zkoušky

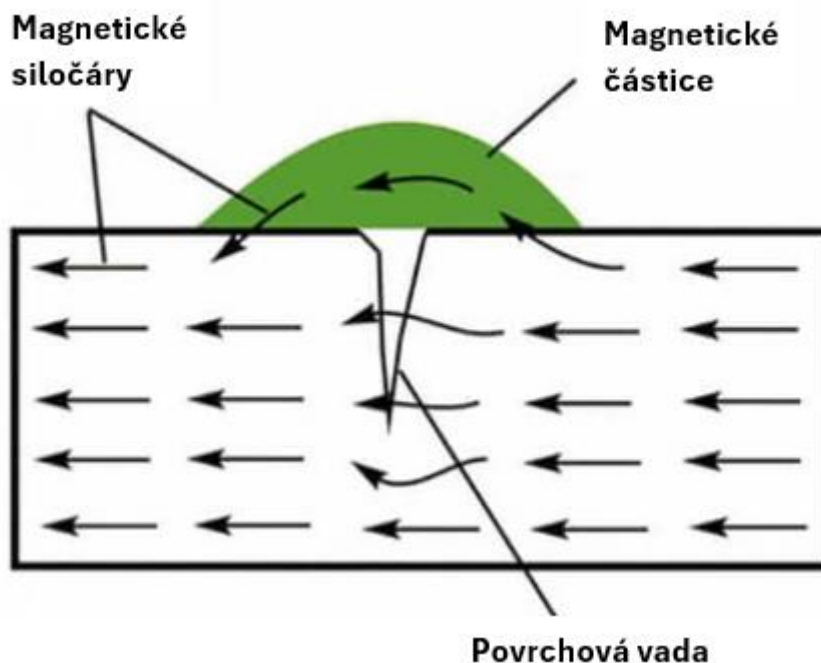
Postup zkoušky by měl být plynulý bez zbytečných prodlev mezi jednotlivými body.

1. Příprava a předčištění – zajištění čistého povrchu bez zbytku nečistot, aby mohl penetrant proniknout do jakékoliv vady. Lze použít mechanická čištění jako kartáčování, broušení, smírkování, případně i chemické čištění za použití vhodných prostředků k odstranění barviv či olejů. Po čištění následuje usušení.
2. Nanesení penetrantu – penetrant se nanáší na povrch nástřikem, natíráním, poléváním, máčením nebo ponořením. Musí se nechat působit určitou dobu, která se liší v závislosti na druhu zvoleného penetrantu, teplotě materiálu a typu detekované vady. Doba působení se pochybuje mezi 5 až 60 min.
3. Odstranění přebytečného penetrantu – musí dojít k odstranění pouze přebytečného penetrantu. Penetrant musí zůstat ve vadách. K odstranění se používá voda či různá rozpouštědla. Nejčastěji se používá k odstranění hadřík, kterým se otře přebytečný penetrant. Lze použít i vysokotlaké stříkání, ale pouze po omezenou dobu.
4. Nanesení vývojky – vývojka se nanáší na povrch v rovnoměrné vrstvě. Doba vyvolání závisí na druhu použité vývojky, používá se suchá, mokrá, nebo žádná. Vývojky jsou činidla, která svým působením zvýrazňují vady. Základem je prášek bílé barvy s jemným zrnem. Převládá použití vývojek na mokré bázi.
5. Kontrola – po uplynutí vyvolávací doby probíhá vizuální kontrola zvýrazněných vad. Je třeba rozeznat rozdíl mezi pravými vadami a například škrábanci, nebo změnami průřezu, které nepatří mezi povrchové vady, ale jsou zvýrazněné.
6. Konečné čištění – slouží k odstranění kapilárních prostředků, aby byl výrobek připraven na další zkoušky. Používá se oplach vodou, nebo různými činidly. [11]

Při dodržení postupu se získává jasně zvýrazněná povrchová vada. Faktory, které ovlivňují tuto metodu jsou jakost povrchu, vlastnost zvoleného kapilárního setu a hledané vady.

### 5.3 Magnetická prášková metoda

Magnetická prášková metoda je jedna z nejpoužívanějších metod pro kontrolu povrchů feromagnetický materiálů. Metoda funguje na principu rozptylových polí, kdy se detekuje povrchová vada pomocí náhlé deformace magnetického pole díky zvýšení odporu. Jev je zobrazen na Obrázku 19. Rozptyl je ta část toku, která je vychýlena z toku a díky tomu může být vada detekována. Míra rozptylu je ovlivněna hlavně velikostí, tvarem a hodnotou magnetické indukce. Aby bylo dosaženo správného měření, je nutné vybudit potřebný magnetický tok a musí dojít ke vzniku rozptylu v místě vady. [12][13]

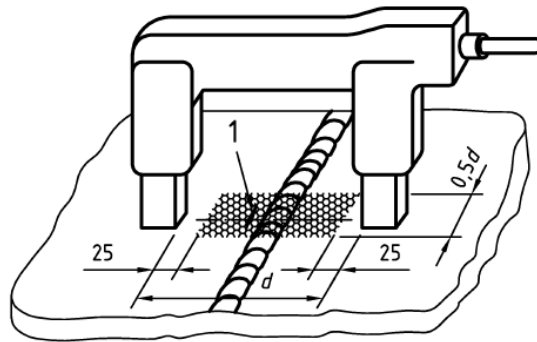


Obrázek 19: Princip fungování metody [13]

#### 5.3.1 Postup metody

Stejně jako kapilární zkouška i magnetická prášková metoda se zaměřuje především na povrchové vady a slouží ke zviditelnění povrchových vad. Dokáže však nalézt vady i těsně pod povrchem. Postup metody se skládá z následujících bodů:

1. Příprava povrchu – povrch musí být zbaven nečistot, které by mohly ovlivnit citlivost zkoušky.
2. Magnetizace předmětu – minimální hustota magnetického toku pro zkoušení je 1 T. K tomu lze použít například elektromagnet jho, který se přiloží na povrchu materiálu stejně jako na Obrázku 20.



Obrázek 20: Elektromagnet jho; rozměry jsou uvedeny v mm [12]

3. Nanesení zkušebních prostředků – obvykle se používají barevné suspenze, nebo fluorescenční částice v kapalině. Nanášení musí probíhat před a během magnetizace.
4. Ukončení magnetizace.
5. Detekce vady – vady by měly být zvýrazněné suspenzí, která se magneticky přichytila na povrch. Vadu lze vyhodnotit na základě barevného a jasového kontrastu. Tím by mělo dojít i k rozlišení nepravých indikací, jakými jsou škrábance.
6. Demagnetizace a čištění – pokud je požadováno, následuje v konečné fázi demagnetizace pomocí demagnetizačních tunelů a případné čištění před dalšími zkouškami. [12]



## 6 Předchozí studie metody HFMI

Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, metoda HFMI se díky svému snadnému použití používá pro zvýšení únavových vlastností svarových spojů. Před začátkem experimentální části, se provedla rešerše na dané téma, zda lze očekávat pozitivní výsledek z experimentu. Tématem metody HFMI se zabýval v roce 2022 kolega Bořek Ozom v jeho diplomové práci, na kterou tato práce navazuje. V zahraničí byla metoda vyzkoušena například na zlepšení únavové pevnosti vysokopevné a hliníkové svařované konstrukci. Dále lze zmínit výzkum zaměřený na účinnost svarových spojů po opracování metodou a zároveň po tepelném zpracování. Zároveň lze zkoumat působení metody na různé materiály s vysokou mezí kluzu.

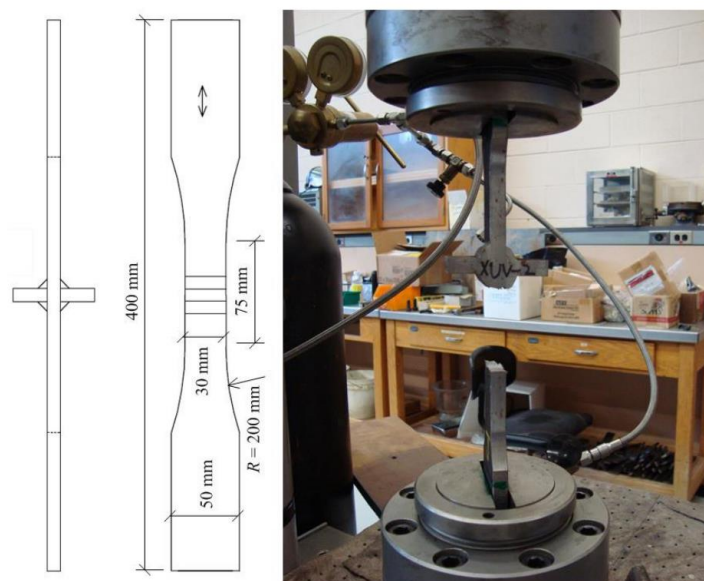
### 6.1 Zlepšení únavové pevnosti vysokopevné a hliníkové svařované konstrukce

Tato práce z roku 2015 se zabývala zlepšením únavové pevnosti svařované konstrukce z vysokopevné oceli a hliníku. V angličtině je práce uvedena pod názvem: Fatigue Strength Improvement of Aluminum and High Strength Steel Welded Structures using High Frequency Mechanical Impact Treatment, jejíž autory jsou Kasra Ghahremania, Rakesh Ranjana, Scott Walbridgea a Ayhan Inceb. Tato studie byla provedena k prozkoumání únavové životnosti svařovaných vzorků z hliníku 5083-H321 a z vysokopevné oceli ASTM A514 s aplikací HFMI.[14]

#### 6.1.1 Princip zkoušky

Únavové zkoušky byly prováděny ve zkušebním rámu až o síle 100 kN. Byly provedeny různé úrovně zatížení, ale frekvence nepřesáhla hodnotu 100 Hz. Zkoušky byly monitorovány a prováděny až do úplného zlomení vzorku. V rámci studie bylo zkoumáno 48 vzorků. Z nich bylo 24 vyrobeno z hliníku a 24 z vysokopevnostní oceli. Polovina vzorků byla testována ve stavu "pouze svařené" (AW, As Welded) a druhá polovina byla podrobena ošetření HFMI. V této studii byly použity dva typy zatížení: konstantní amplituda (CA) a proměnná amplituda (VA). [14]

Ukázka rozměru vzorku a zkušebního zařízení je na obrázku 21.



Obrázek 21: Rozměry vzorku a zkušební zařízení [14]

### 6.1.2 Výsledky studie

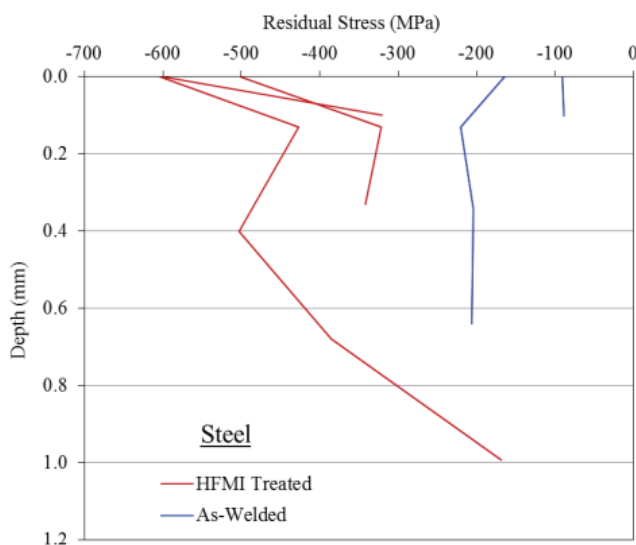
Výsledky studie jsou uvedeny v Tabulce 2. Tabulka je rozdělená na dvě hlavní části, a to pro ocel a hliník. Ve sloupci S-N Curve (S-N křivka) lze vidět rozdělení na střední S-N křivku (mean S-N curve) a návrhovou S-N křivku (design S-N curve). Střední S-N křivka je označení pro křivku s 50% pravděpodobností neporušení. IIW obvykle uvádí hodnoty pro návrhovou S-N křivku s pravděpodobností neporušení svaru ve výši 95 %. V následujících sloupcích, kde je označení  $\Delta S$  (MPa) uvádí hodnoty rozkmitu napětí. Počet cyklů je rozdělen do tří sloupců. V prvním jsou uvedeny hodnoty pro pouze svařené vzorky, ve druhém je uveden počet cyklů pro vzorky, které byly opracovány HFMI. V posledním sloupci je vidět spočítaný poměr zlepšení únavové životnosti (HFMI/AW). [14]

Tabulka 2: Výsledky studie [14]

Material	S-N Curve	$\Delta S$ (MPa)	Number of Cycles, $N$		
			AW	HFMI	HFMI/AW
Steel	Mean	302	1.00E+05	1.57E+06	15.7
		86	2.00E+06	1.79E+09	895
	Design	199	1.00E+05	2.13E+06	21.3
		57	2.00E+06	2.43E+09	1214
Aluminum	Mean	104	1.00E+05	2.61E+05	2.6
		64	2.00E+06	9.87E+06	4.9
	Design	93	1.00E+05	1.38E+05	1.4
		57	2.00E+06	5.22E+06	2.6

Získané výsledky dokazují, že ošetření HFMI vedlo ke zvýšení únavové životnosti jak u vzorků svařenců hliníku (5083-H321), tak u vzorků svařenců vysokopevné oceli (ASTM A514), jak při konstantní amplitudě zatížení, tak při proměnné amplitudě zatížení. Největší zlepšení bylo u vzorků z vysokopevné oceli. [14]

Protože metoda HFMI má významný vliv na geometrii svaru a zároveň snížení zbytkového napětí byla provedena měření zbytkového napětí. Jak vyplývá z obrázku 22, aplikace HFMI vede k výraznému snížení zbytkového napětí poblíž povrchu (do hloubky 1 mm).



Obrázek 22: Zbytkové napětí poblíž povrchu [14]

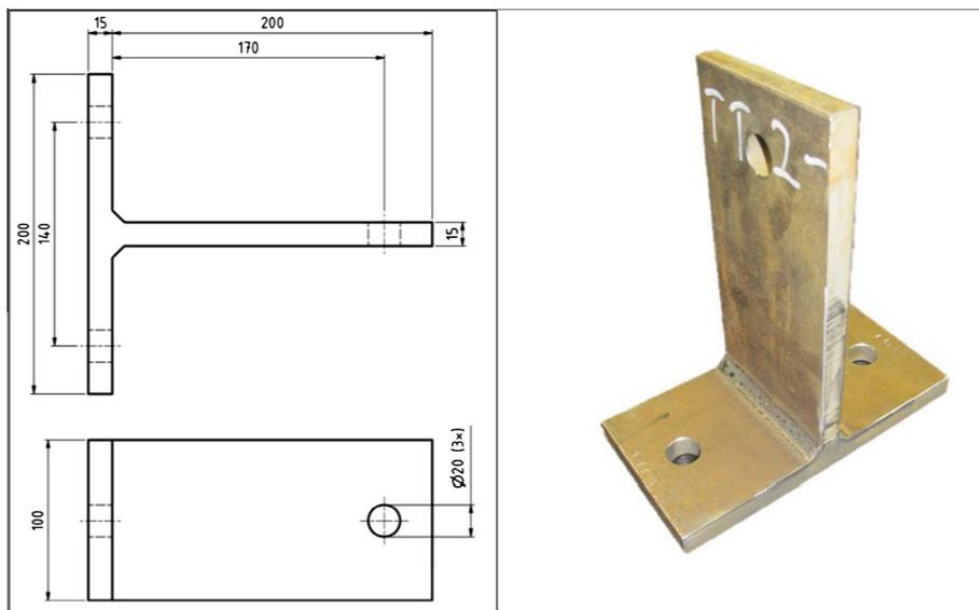
Tato studie potvrdila jako jedna z mnoha, že metodu HFMI lze použít pro zlepšení životnosti jak svarové konstrukce z oceli, tak i z hliníku. Pro experimentální program této práce může posloužit jako inspirace svým zpracováním. V experimentu se budou jako této v studii porovnávat vzorky s rozdílnou charakteristikou, respektive opracováním. Pokud to bude možné, budou vybrané vzorky poslány na externí změření zbytkového napětí, podobně jako v této studii.

## 6.2 Účinek HFMI na vysokopevnou ocel

Tato studie z roku 2016 byla zaměřena na aplikaci HFMI na vysokopevnou ocel s mezí kluzu 1300 MPa. V originále je tato práce uvedena pod názvem: Effect of high frequency mechanical impact treatment on fatigue strength of welded 1300 MPa yield strength steel, jejíž autoři jsou Ebrahim Harati, Lars-Erik Svensson, Leif Karlsson a Mattias Widmark. Základní materiál byla ocel s označením Weldox 1300, která má vysokou pevnost s tloušťkou plechu 15 mm.[15]

### 6.2.1 Princip zkoušky

V této studii byl použit svařenec velmi podobného tvaru, jako bude zkoumán v experimentální část. Geometrie svaru je uvedena na Obrázku 23 společně s modelem. I zde se metodou HFMI opracovaly potřebné paty svaru. Jedná se tedy o dva koutové svary. [15]

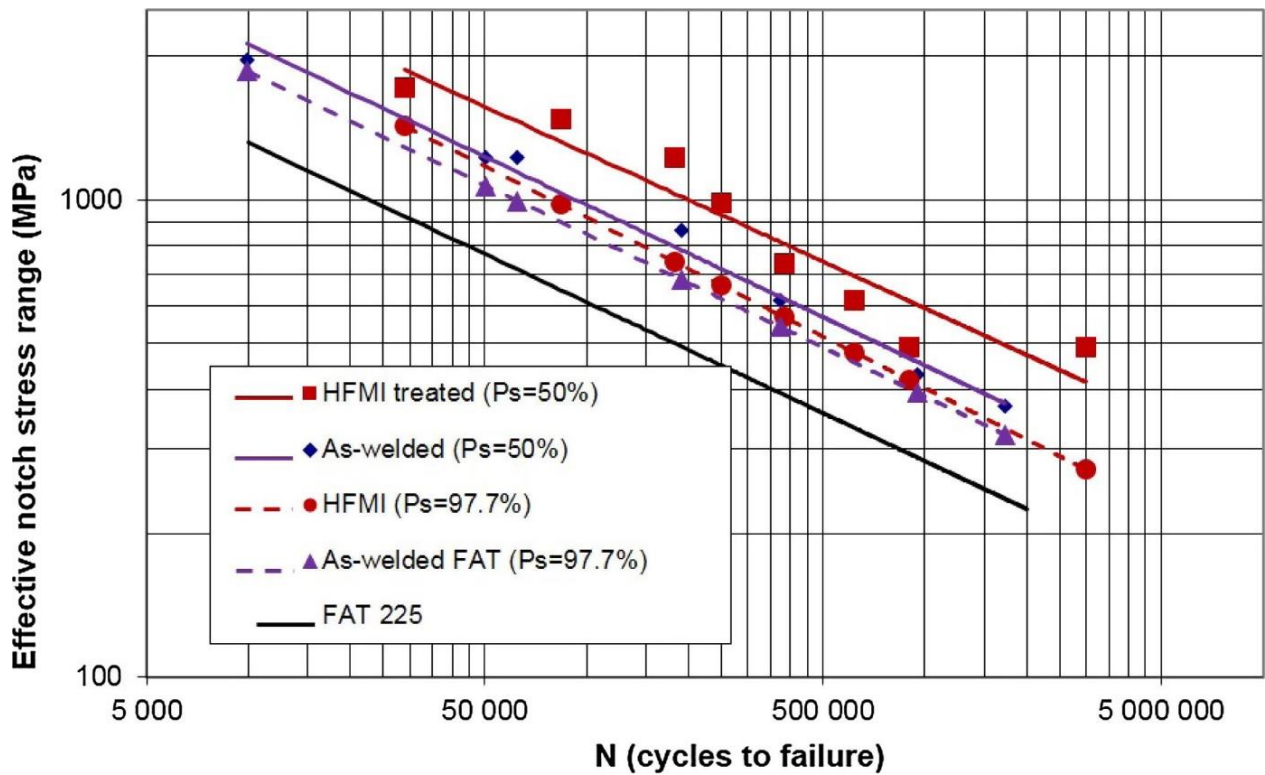


Obrázek 23: Geometrie vzorku [15]

Únavové zkoušky byly provedeny pomocí hydraulického zařízení MTS ServoHydraulic o síle 250 kN, při zatížení s konstantní amplitudou. Testování probíhalo s frekvencí 3–7 Hz. Celkem se testovalo 15 vzorků, z nichž 7 bylo pouze svařených a zbylé vzorky byly podrobeny ošetření pomocí metody HFMI. [15]

### 6.2.2 Výsledky zkoušky

Ve většině vzorků došlo ke vzniku únavové trhliny. Počty cyklů do poruchy s umístěním poruchy jsou uvedeny na Obrázku 24 níže.



Obrázek 24: Výsledky únavových zkoušek T-spojů ve stavu bez a s použitím HFMI a porovnání s návrhovou křivkou třídy FAT 225 z doporučení IIW [15]

Místa poruchy označují patu svaru, kde k ní došlo. Pro orientaci byl vytvořen Obrázek 25.

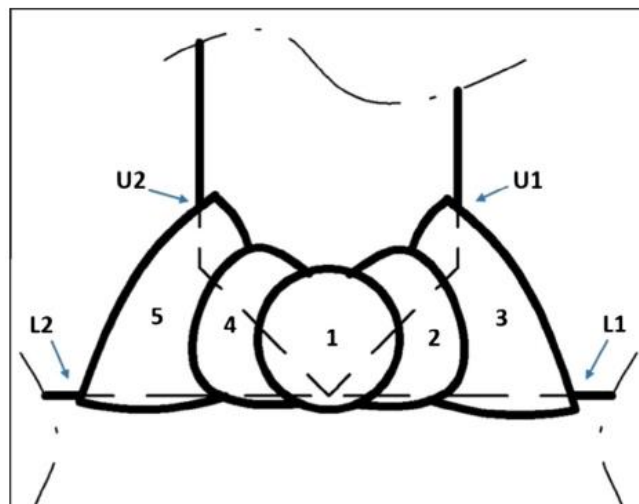


Fig. 1. The welding sequence with five beads. The upper (U1 and U2) and lower weld toes (L1 and L2) in the first and second welded sides are also shown.

Obrázek 25: Přehled označení míst na patě svaru [15]

Jak lze pozorovat na výsledcích, metoda HFMI byla úspěšně aplikována a byly dosaženy pozitivní výsledky. Došlo ke zlepšení únavové pevnosti o 26 %. Dále zároveň byla změřena zbytková napětí, ve směru podélném dosahovaly maximální hodnoty 800 MPa a ve směru příčném 250 MPa. Po aplikaci zároveň došlo ke zvýšení tvrdosti v oblasti kovu tak i teplem ovlivněné oblasti. [15]

Tato práce se byla prozkoumána především z podobnosti zkoumaného vzorku. Zároveň opět potvrdila vysokou efektivitu metody a může posloužit jako inspirace při zpracování. Průběh a vyhodnocení zkoušky odpovídá průběhu navrženého experimentu.

### 6.3 Zvyšování únavové životnosti svarů vysokopevnostních ocelí metodou HFMI

Dále je třeba zmínit diplomovou práci, na kterou tato práce navazuje. Jedná se o diplomovou práci z roku 2022 na téma: Zvyšování únavové životnosti svarů vysokopevnostních ocelí metodou HFMI, jejíž autorem je Bořek Ozom. Podobně jako výše zmíněné práce i zde se zkoumal vliv HFMI na svarové konstrukce. Únavové zkoušky byly provedeny na dvou různých materiálech, a to na oceli S235JR a S460MC. Experimentální část probíhala ve stejných prostorách a na stejných zařízeních, na kterých budou zkoumané i vzorky v rámci této diplomové práce. [16]

#### 6.3.1 Princip zkoušky

Princip zkoušky probíhal stejně jako u výše zmíněných prací. Byly připraveny svarové konstrukce, každá z rozdílné oceli. Na polovině vzorků byla po svaření provedena aplikace technologie HFMI. Následně byly všechny vzorky podrobeny únavovým zkouškám. Vzorky byly namáhány nenulovým minimálním napětím (10 MPa) a neustále byly zatíženy tahovým napětím. Je důležité uvést, že jako kritérium pro ukončení únavové zkoušky bylo stanoveno povolení vzorku o 5 mm ve směru zatěžování. V tabulce 3 jsou uvedeny svařovací parametry, kterými byly plechy svařeny. [16]

Tabulka 3: Svařovací parametry [16]

Parametry / Svar	Kořenová vrstva (Přerušovaný koutový svar 100 mm)	Krycí vrstva (Souvislý koutový svar 700 mm)
Svařovací napětí – $U$	26 V	29 V
Svařovací proud – $I$	210 A	230 A
Rychlost drátu – $v_d$	7 m/min	10,5 m/min
Svařovací rychlost – $v_s$	361 mm/min	134 mm/min
Specifické vnesené teplo – $Q_s$	0,728 kJ/mm	2,39 kJ/mm

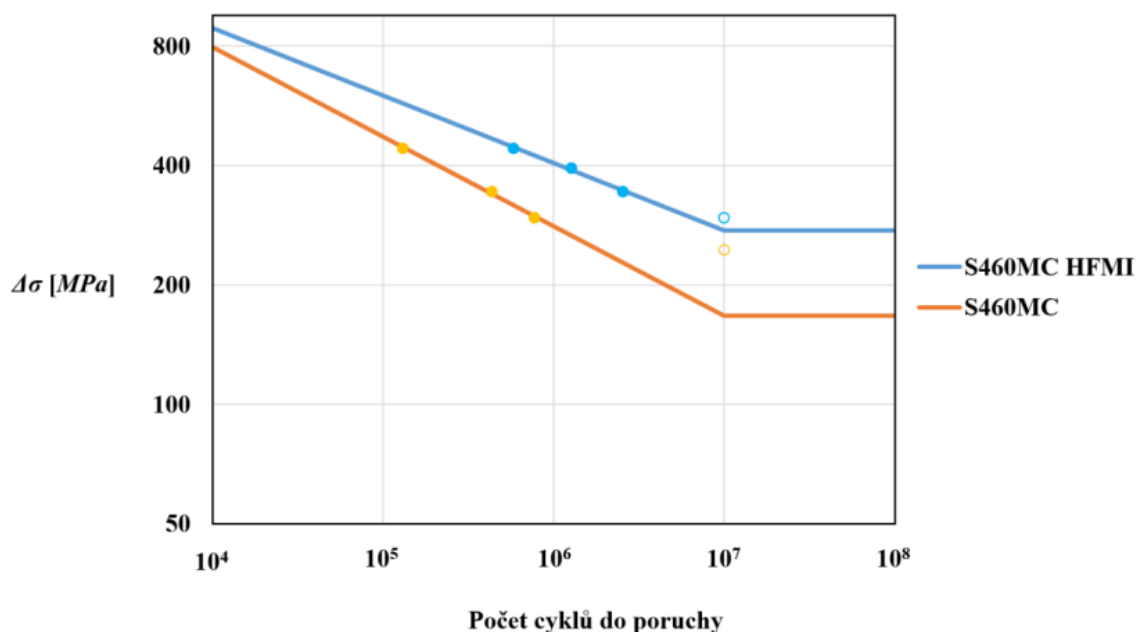
### 6.3.2 Výsledky zkoušek

Níže jsou v tabulce 4 uvedeny výsledky zkoušek pro materiál S460MC. Na druhý materiál S235JR nebyla metoda HFMI až tolik účinná jako již uvedený materiál. Výsledky byly i přesto pozitivní. Materiál S460MC bude použit i v následujícím experimentu. [16]

Jak lze vyčíst z naměřených dat v tabulce 8, při zkoumání se měnila napětí, jimiž se zatěžovaly zkoumané vzorky. Při porovnání počtu cyklů do lomu je patrné, že vzorečky opracované technologií HFMI mají značně vyšší životnost. Na základě dat byl zhotoven S-N diagram, který pro přehlednost potvrzuje funkčnost metody, viz obrázek 26. [16]

Tabulka 4: Parametry únavových zkoušek ocel S460MC [16]

Pořadí zkoušek	Střední síla [kN]	Amplituda [kN]	Max. síla [kN]	Počet cyklů do lomu vzorku bez aplikace HFMI	Počet cyklů do lomu upraveného vzorku s aplikací HFMI	Poměrné zlepšení životnosti ve vztahu k počtu cyklů do porušení
1	4,6	4,4	9	131.000	581.000	4,5
5	4,1	3,9	8	Zk. nebyla provedena	1.270.000	-
2	3,6	3,4	7	434.000	2.550.000	5,9
3	3,1	2,9	6	775.000	10.000.000 Bez porušení	≥ 10
4	2,6	2,4	5	10.000.000 Bez porušení	Zk. nebyla provedena	-



Obrázek 26: Wöhlerova křivka pro ocel S460MC [16]

I tato práce potvrdila, že technologie HFMI je vhodnou volbou pro zvýšení únavové životnosti svařovaných konstrukcí. Na uvedenou práci navazuje experimentální část. V níž bude zkoumán stejný materiál, tedy S460MC. Samotný experiment se zabývá opravou vzniklých trhlin a dosud neexistuje žádná podobná studie. Z této práce lze čerpat především z provedení experimentu a z jeho vyhodnocení. Zároveň získaná data mohou sloužit pro porovnání.

## 7 Použití HFMI na mostních konstrukcích

Práce je financovaná v rámci projektu s ČVUT fakultou stavební, která se zabývá zvyšováním únavové odolnosti pro mosty. Proto je vhodné uvést použití HFMI na mostních konstrukcích a jaká pozitiva může aplikace přinést.

Jeden z mnoha faktorů, se kterými se musí počítat při aplikaci HFMI na mostní konstrukce je ten, že mostní konstrukce mají obvykle větší tloušťku desek. S rostoucí tloušťkou klesá únavová životnost svarového spoje a možnosti metody HFMI na aplikaci na desky velkých tloušťek jsou zatím ověřeny velmi malým množstvím zkoušek.

### 7.1 Praktická aplikace – most přes Schenkendorfstrasse v Mnichově

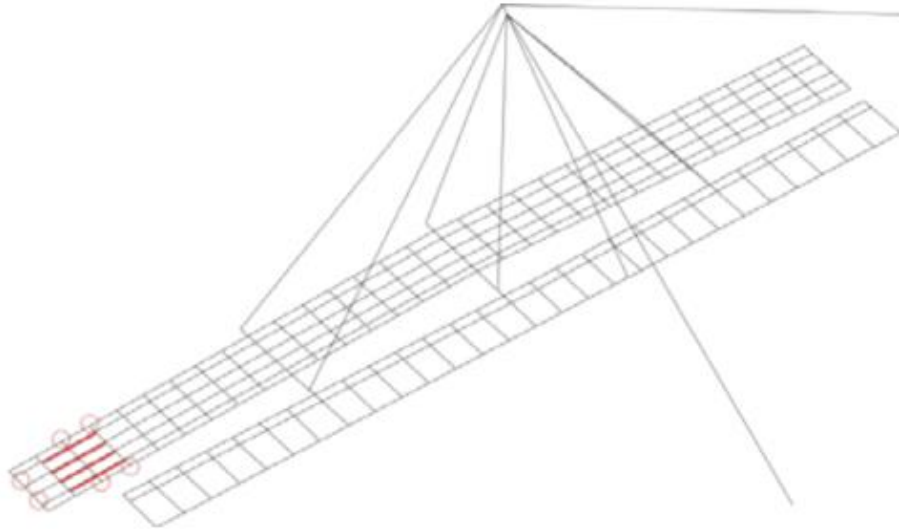
Most přes Schenkendorfstrasse v Mnichově je kombinovaná stezka pro pěší/cyklisty a tramvajový most, který je vystaven únavě kvůli své speciální ocelové konstrukci a zatížení. Mostní konstrukce visí na šesti lanech ze šikmého stožáru ukotveného na jih a západ. Dvojice lan drží jeden ze tří hlavních příčných nosníků, které nesou na jedné straně tramvajový most a na straně druhé most pro pěší a cyklostezku viz Obrázek 27. [19, 20]



Obrázek 27: Most přes Schenkendorfstrasse [20]

Byla zde prvně použita metoda HiFIT při návrhu a realizaci ve velkém projektu. Kromě zamýšleného zvýšení životnosti, nabídl projekt také možnost získat praktické zkušenosti s použitým procesem následné úpravy. Aby se splnily přísné požadavky na únavovou životnost po dobu 100 let pro těžké cyklické zatížení tramvajemi, bylo ošetření HiFIT použito ve svrchní stavbě poblíž jejího severního konce viz Obrázek 28. [19, 20]

Ošetřeny byly především svarové spoje hlavních nosníků poblíž konce mostu, spoje mezi příčnými nosníky a hlavními nosníky a spoje s opěrami. Ošetřené části jsou zvýrazněny na obrázku níže v levé části.



Obrázek 28: Přehled upravených částí v mostě [19]

## 7.2 Most v Mülheimu

Most Ruhrstrom se nachází v Mülheimu-Duisburgu v Německu. Je v provozu od roku 1971 a skládá se z paralelních mostů s identickými jednoduše podepřenými ocelovými svrchními konstrukcemi, které přenášejí železniční trať přes řeku Ruhr a okolní louky, viz obrázek 29. [19, 20]



Obrázek 29: Most přes řeku Ruhr v Mülheimu [19]

Hlavní nosníky a koncové příčné nosníky jsou vyrobeny z oceli S355, zatímco zbytek konstrukce je z oceli S235. V souvislosti s inspekcí mostu byly nalezeny trhliny o délce 20 mm v hlavních nosnících u svařených spojů. Byly provedeny pokusy o zastavení dalšího šíření trhlin pomocí vrtání, ale trhliny stále pokračovaly až do délky 45 mm. Následoval opět pokus



o opravu pomocí vrtání. Kvůli poškození musela být maximální rychlost pro železniční provoz snížena na 90 km/h. Rekonstrukcí mostu se mělo docílit opět navýšení traťové rychlosti na traťovou normu 160 km/h. [19, 20]

V rámci rekonstrukce proběhlo spojení příčnicku s hlavními nosníky šroubovým spojem a připojením podélného nosníku pro zlepšení podélného rozložení a dynamického chování nástavby (Obrázek 30). Pro opravu prasklin v hlavním příčném nosníku byly spoje uvolněny, znovu svařeny a nakonec vybroušeny. Stavební firma ošetřila všechny nepoškozené svarové spoje příčné výztuhy metodou HiFIT. [19, 20]



Obrázek 30: Připevnění podélného nosníku [19]

# Experimentální část

## 8 Experimentální část

Hlavním cílem experimentální části je ověření hypotézy, že vzorky, které byly nejen převařeny, ale také upraveny pomocí metody HFMI, vykážou delší únavovou životnost než vzorky pouze převařené. K realizaci tohoto cíle byl navržen experiment, jehož prvním krokem bylo vyrobít zkušební díly. Ty byly následně testovány únavovými zkouškami na zkušebním standu v laboratoři RTI na Západočeské univerzitě. Únavové zkoušky byly prováděny do okamžiku vzniku únavové trhliny v patě svaru u všech vzorků. Detekce trhlín proběhla pomocí nedestruktivních metod a následně byly trhliny opraveny vyříznutím poškozené části a opraveny převařením. Po opravě byly vzorky rozděleny do dvou skupin: první skupina byla pouze převařena, zatímco na druhou skupina byla aplikována metoda HFMI. Obě skupiny byly opětovně podrobeny únavovým zkouškám. Zaznamenané výsledky byly analyzovány s cílem zjistit, zda experiment potvrdil či vyvrátil původní hypotézu. V teoretické části byly uvedeny tři studie, které se zabývaly zkoumáním účinnosti metody HFMI na zhotoveném svaru a teprve poté byly provedeny únavové zkoušky. Navržený experiment je tedy jedinečný, protože se tímto problémem nezabývala doposud žádná další studie.

Popis experimentální části bude rozdělen na několik kapitol, které se budou zabývat popsáním a vyhodnocením získaných výsledků. Nejprve bude popsán zkoumaný materiál, následně postup výroby vzorků, přístroj pro únavové zkoušky, oprava vzorků, hodnoty únavových zkoušek a následné jejich vyhodnocení.

### 8.1 Materiál

Pro experimentální účely byla zvolena ocel S460MC. Jedná se o termomechanicky válcovaná konstrukční ocel, která je specificky vhodná pro tváření za studena. Tato ocel je obzvláště užívána pro ocelové konstrukce díky své minimální meze kluzu 460 MPa. Je třeba zdůraznit, že při tváření za tepla s teplotou nad 580 °C a delším časovým působením může dojít ke snížení meze pevnosti a meze kluzu, což značně omezuje možnosti jejího tepelného zpracování. Chemické složení oceli je podrobně specifikováno v tabulce 5 s uvedením maximálních možných hodnot, zatímco mechanické vlastnosti jsou vykážány v tabulce 6.[17]

Tabulka 5: Chemické složení oceli v % [17]

Ocel	C	Mn	Si	Al	Nb	Ti	P	S
S460MC	0,12	1,60	0,50	0,015	0,09	0,15	0,025	0,015

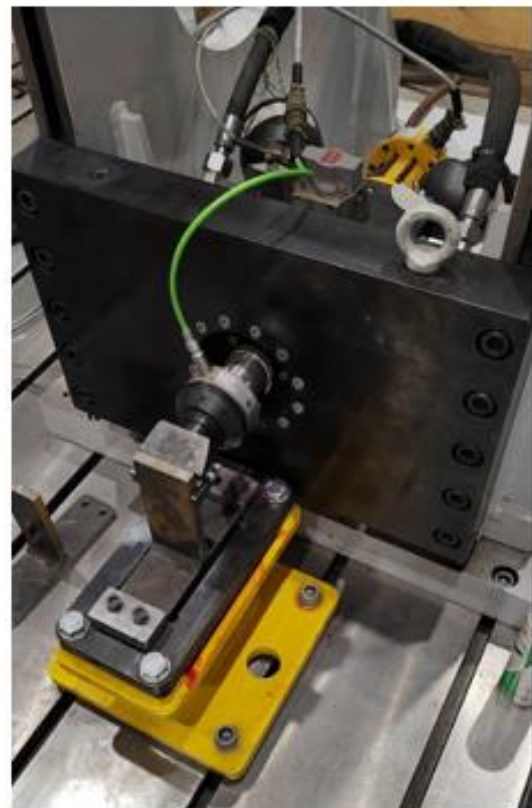
Tabulka 6: Mechanické vlastnosti oceli [17]

Jmenovitá tl. [mm]	Mez kluzu Re [Mpa]	Mez pevnosti Rm [MPa]	Tažnost A [%]
3-15	Min. 460	520-670	17

Ocel je velmi dobře svařitelná díky nízkému uhlíkovému ekvivalentu. V teplem ovlivněné oblasti není zaznamenané žádné významné zvýšení tvrdosti. Předehřev není nutný za normálních svařovacích podmínek, doporučuje se pouze v případě teplot pod +5°C a pro tloušťku plechu větší jak 25 mm. [17]

## 8.2 Zařízení pro únavové zkoušky

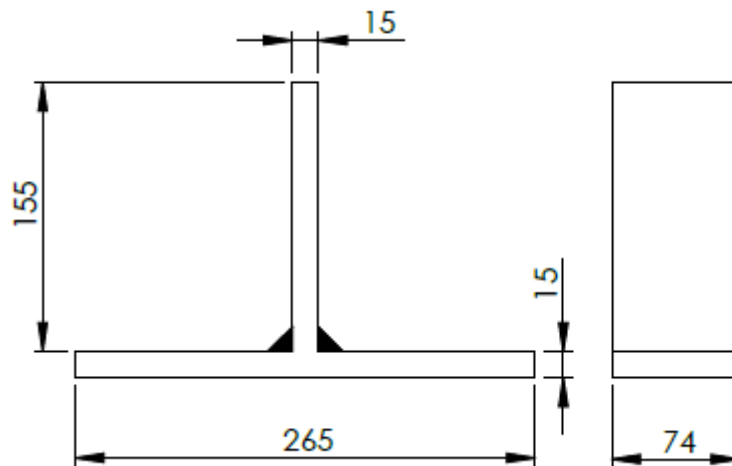
Únavové zkoušky byly provedeny na pracovišti RTI na ZČU, kde je k dispozici zkušební stand, na kterém se provádí únavové zkoušky. Zatěžování zajišťuje elektrohydraulický systém od společnosti INOVA, specificky hydraulický válec AH-100-250-M06 a snímač síly GTM série K s kapacitou 100 kN. Vzorek je upevněn čtyřmi šrouby M12 k držáku a po odšroubování je možné vzorek snadno vyjmout z přípravku. Držák je připevněn čtyřmi šrouby M20 ke svařovanému podstavci, který je montován k T-drážkovému poli. Jak podstavec, tak držák mají precizně obrobené dosedací plochy, což zajišťuje jejich optimální spojení. Hydraulický válec je propojen s redukcí a snímačem síly GTM série K s kapacitou 100 kN. Ke snímači se montuje zatěžovací klín s povrchově kalenou kontaktní plochou. Správné středění těchto komponent je zajištěno středovým kolíkem. Při montáži standu je nezbytné pečlivě kontrolovat polohu jednotlivých součástí, aby byl zajištěn rovnoměrný kontakt klínu se vzorkem.



Obrázek 31: Zařízení pro únavové zkoušky

### 8.3 Experimentální vzorky

Pro experiment musely být vyrobeny vhodné vzorky o správných rozměrech, aby mohly být použity v zařízení pro únavové zkoušky. Jako materiál byla zvolena ocel S460MC. Ke zhotovení byly připraveny dva plech o tloušťce 15 mm. První plech posloužil jako základna o délce 265 mm. Druhý plech o výšce 155 mm byl umístěn doprostřed prvního plechu. Rozměry vzorku jsou na Obrázku 32.



Obrázek 32: Rozměry vzorku

Před svařením plechů došlo ještě ke zkosení hran na jedné straně druhého plechu, aby připravená svarová plocha odpovídala normě ČSN EN 9692-1. Svařením plechů vznikne oboustranný  $\frac{1}{2}V$  – svar. Pro zhotovení byl využit speciální přípravek, který pomohl upevnit plechy do správné polohy. Zároveň byl nakloněn, aby se docílilo více provařeného kořene svaru a zároveň se i tím usnadnilo zhotovení svaru. Před zhotovením prvního nepřerušovaného svaru se nejdříve plechy k sobě přivařily ve třech bodech (metoda heftování), aby byla zajištěna jejich poloha. Svařovací přípravek, heftování a první nepřerušovaný svar jsou na Obrázku 33.



Obrázek 33: Svařovací přípravek, heftování a první souvislý svar

Po vytvoření prvního souvislého svaru následovalo znovu převaření, aby se vytvořila dokonalá krycí vrstva a vznikl tak kvalitní svarový spoj. Celkový svařenec a detail svarové housenky je uveden na níže na Obrázku 34.



Obrázek 34: Celkový svařenec a detail svarové housenky

Dalším krokem bylo nařezání svařence na vzorky o šířce 74 mm (viz výkres Obrázek 32). K tomu byla použita pásová pila (Obrázek 35). Začátek a konec svařence byly odříznuty z důvodu odstranění míst ve svaru, kde se vyskytuje nejvíce vad. To by mohlo ovlivnit průběh zkoušky a tím i získané výsledky. Tímto způsobem bylo vyrobeno celkem 12 vzorků, které byly připraveny na únavové testování.



Obrázek 35: Řezání svařence na pásové pile

### 8.3.1 Svařovací parametry

Pro svařovací proces byly nastaveny parametry uvedeny v tabulce 7.

Tabulka 7: Svařovací parametry

Parametr	Kořenová vrstva	Krycí vrstva
Svařovací napětí [V]	29,3	32,2
Svařovací proud [A]	232,4	255,4
Rychlost podávání drátu [m/min]	10,6	12,5
Přídavný materiál	G4Si1	
Ochranný plyn	Stargon C18	

Pro zhotovení svaru bylo zvoleno manuální svařování metodou MAG a z tohoto důvodu se v tabulce neuvádí svařovací rychlost.

Stargon C18 je aktivní ochranný plyn, který se skládá ze směsi argonu a oxidu uhličitého. Jako přídavný materiál byl zvolen svařovací drát s označením G4Si1. Jeho chemické složení a mechanické vlastnosti jsou uvedeny v tabulce 8.[18]

Tabulka 8: Chemické složení a mechanické vlastnosti drátu G4Si1 [18]

Složení / Vlastnosti	Chemické složení
C [hm %]	0,09
Si [hm %]	0,92
Mn [hm %]	1,73
	Mechanické vlastnosti
Mez kluzu Re [MPa]	480
Mez pevnosti Rm [MPa]	540
Tažnost A [%]	28

## 9 Únavové zkoušky

K únavovým zkouškám bylo připraveno celkem 12 zkušebních těles. Všechny zkoušky byly řízeny silou, jednalo se vždy o zatěžování konstantní amplitudou (harmonické zatěžování). Kritériem porušení byl vznik makroskopické trhliny, která byla detekována zvýšením amplitudy posuvu ve zkušebním válci. Kvůli konstrukci zkušebního standu a zajištění toho, že bude beran stále v kontaktu se zkušebním tělesem, bylo pro prvních šest zkušebních vzorků zvoleno zatěžování v tahu. Konkrétní nastavené hodnoty síly zatěžování byly:  $F_{max} = 7 \text{ kN}$  a  $F_{min} = 1 \text{ kN}$ . Pro další šestici vzorků byla následně snížena zatěžovací síla na  $F_{max} = 6 \text{ kN}$  a  $F_{min} = 0,86 \text{ kN}$ , kvůli zachování poměru  $R = \frac{F_{min}}{F_{max}} \approx 0,14$  z první hladiny zatěžování. Cílem bylo přiblížení se hodnotám kolem meze únavy zkoušeného tělesa. Frekvence zatěžování byla 15 Hz.

### 9.1 Kalibrace kritéria pro vznik makroskopické trhliny

Než mohlo proběhnout únavové testování připravených vzorků bylo potřeba najít hraniční parametr pro ukončení zkoušky tak, aby vznikla požadovaná únavová trhlina. K tomu bylo připraveno několik vzorků, na kterých se testovalo kritérium ukončení zkoušek.

Všechny tyto vzorky byly zhotoveny přesně podle již zmíněného postupu a byly podrobeny zkouškám se zatížením o síle  $F_{max} = 7 \text{ kN}$  a  $F_{min} = 1 \text{ kN}$ . Měnilo se však kritérium ukončení zkoušky v podobě limitního posuvu válce. Hodnota „ohnutí“ vzorku ve směru zatěžování. Zkoušené vzorky jsou zobrazeny na Obrázku 36.

Je vidět, že při nastavení hodnoty posuvu na 5 mm (vzorek vlevo) došlo k vytvoření příliš velké trhliny, která dosahuje téměř tloušťky plechu. Upravila se tedy hodnota posuvu na 3 mm, při které se vytvořila stále příliš velká únavová trhlina. Na vzorku 4 se naopak vytvořila trhlina malých rozměrů. Jako ideální kritérium pro ukončení únavových zkoušek bylo považováno „ohnutí“ vzorku o 2,7 mm ve směru zatěžování. Při této hodnotě je zaručený vznik požadované únavové trhliny v patě svaru, která bude mít vhodnou velikost pro následnou opravu.



Obrázek 36: Zkoumané vzorky pro určení hodnoty ohnutí



## 9.2 Vyhodnocení prvních únavových zkoušek

Následně po zjištění a nastavení kritéria pro zastavení zkoušky, která se kontrolovalo pomocí indukčního snímače posuvu v zatěžovacím válci, byly provedeny první únavové zkoušky všech dvanácti vzorků. Nastavené parametry a výsledky zkoušek jsou uvedeny níže v tabulce 9.

Tabulka 9: První únavové zkoušky

Vzorek	$F_{\max}$ [kN]	$F_{\min}$ [kN]	Počet cyklů do porušení [-]	Kritérium ukončení zkoušky [mm]
1	6	0,86	10 000 000	-2,7
2	6	0,86	10 000 000	-2,7
3	6	0,86	10 000 000	-2,7
4	6	0,86	978 802	-2,7
5	6	0,86	375 117	-2,7
6	6	0,86	240 562	-2,7
7	7	1	247 643	-2,7
8	7	1	141 911	-2,7
9	7	1	230 719	-2,7
10	7	1	323 535	-2,7
11	7	1	397 932	-2,7
12	7	1	263 396	-2,7

Jak je vidět dle výsledků z tabulky u vzorků 7 až 12 nedošlo k výrazným výchylkám u počtu cyklů do vzniku makroskopické trhliny. V případě 3 vzorků s označením 1 až 3 však nedošlo vůbec k detekci trhliny a zkoušky byly ukončeny dosažením  $10^7$  cyklu bez porušení. Možnou příčinou rozptylu výsledků je nejspíše lidský faktor při svařování.

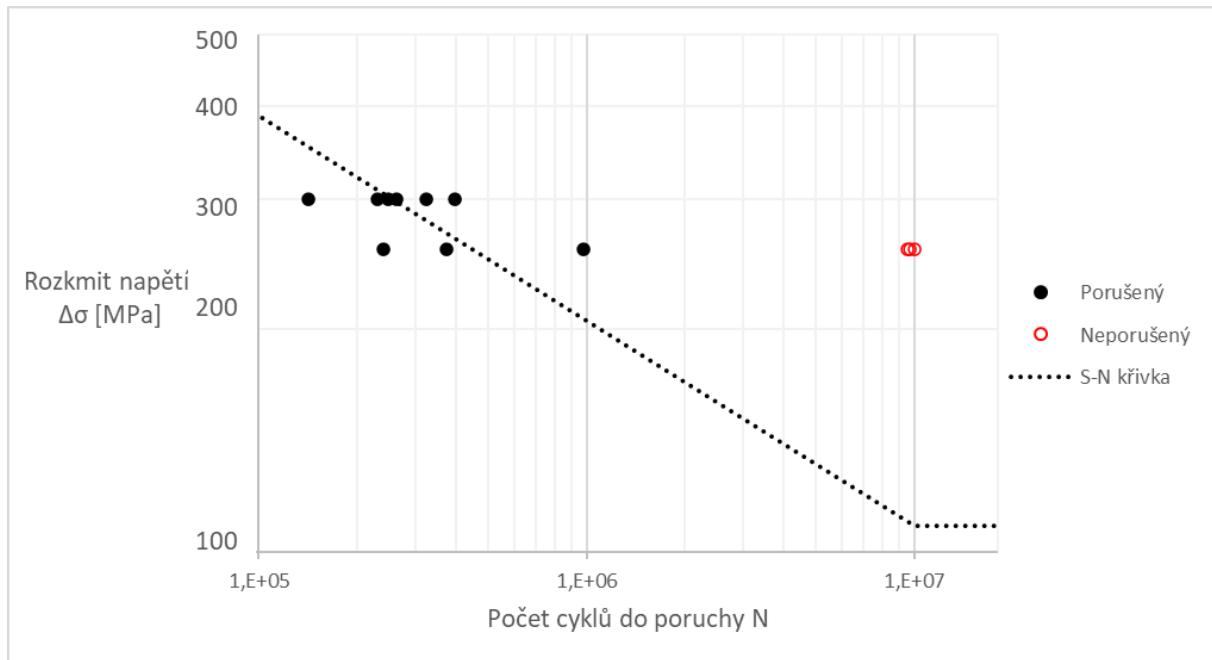
Ze získaných dat byla vytvořena Wöhlerova křivka (Obrázek 37). Na svislé ose byl vyneseno rozkmit napětí. Výška beranu byla nakonfigurována tak, že 1 kN odpovídá 50 MPa hot-spot extrapolovanému napětí v patě svaru.

Odhad rovnice šikmé větve S-N křivky lineární regresí je:

$$\log N = 14,3 - 3,6 \log \Delta\sigma,$$

což jsou hodnoty, které jsou ve velmi dobré shodě s hodnotami, které předpokládá norma Eurokód 3:

$$\log N = 12,2 - 3 \log \Delta\sigma.$$



Obrázek 37: Wöhlerova křivka pro první únavovou zkoušku

### 9.3 Oprava trhlin

Po ukončení únavových zkoušek následovalo postupné opravování trhliny. Bylo potřeba nejdříve detekovat vzniklou trhlínu. K tomu byla použita vizuální a kapilární metoda z nedestruktivních zkoušek.

Jak je vidět na obrázku 38, na všechny vzorky byl aplikován penetrant, který se následně oťel a zůstal pouze ve vzniklé trhlíně, případně jiných defektech. Následně se nanasla vývojka, která zviditelnila nalezené vady, tedy únavovou trhlínu.



Obrázek 38: Detekce trhliny pomocí kapilární zkoušky

Po detekci trhliny byla poté postupně vybroušena. Cílem bylo její kompletní odstranění. Vždy se odbrousil kus vzorku a provedla se opět kapilární zkouška pro ověření, zda došlo k odstranění trhliny, nebo je pozorovatelný ještě její zbytek. Výsledek vybroušení je vidět na Obrázku 39.



Obrázek 39: Broušení trhliny

Druhým krokem po vybroušení bylo připravení náběhových a výběhových hran. Již bylo zmíněno, že začátek a konec svaru jsou místa, kde se vyskytuje nejvíce vad. Při výrobě vzorků se tato oblast odřízla na pile. Při opravě se tento problém vyřešil tak, že se na boky vzorku navařily provizorní hrany, které poslouží jako místa, kde bude začínat a končit svar. Tím se zařídil ve vybroušeném místě vznik kvalitní kořenové a následné krycí vrstvy. Parametry svařování byly nastaveny stejně jako je uvedeno v Tabulce 7.

Na Obrázku 40 je ukázka náběhové a výběhové hrany po svaření kořenové vrstvy, následně byla navařena krycí vrstva. Po dokončení převarování byly hrany odříznuty a samotný svar poté očištěn.



Obrázek 40 Náběhové a výběhové hrany společně s kořenovou vrstvou:

### 9.3.1 Aplikace HFMI

Po opravě a očištění vzorků byla na 5 vzorcích aplikovaná metoda HFMI na paty svaru a na 4 vzorky aplikována nebyla. Na obrázku 41 je vidět aplikace HFMI, kterou lze poznat podle lesklých linií na patě svaru.

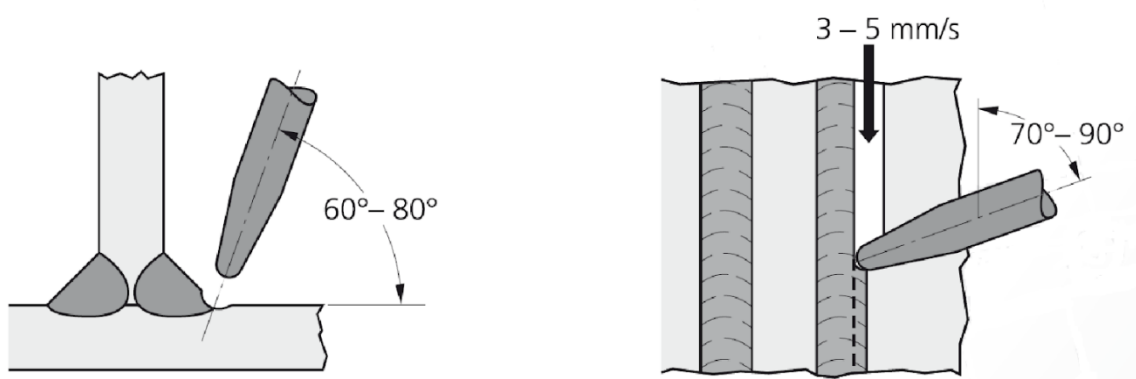


Obrázek 41: Aplikace HFMI na očištěný svar

Pro dosažení optimální efektivity je třeba provádět kladívkování pod specificky stanovenými úhly a rychlostmi v zóně ztavení, což je přechodová oblast mezi svarem a základním materiálem. Před zahájením prací je nutné pečlivě zkontrolovat hrot pomocí speciálního měřidla. Následující parametry jsou doporučeny pro správné kladívkování:

- úhel kladívkování:  $70^\circ$  až  $90^\circ$  ve směru kladívkování;
- úhel vůči povrchu základního materiálu:  $60^\circ$  až  $80^\circ$ ;
- rychlost kladívkování: 3 – 5 mm/s, přičemž vyšší hodnoty jsou také přijatelné;
- kontrola velikosti hrotu s využitím speciální měřicí šablony dle rádiusu.

Znázornění rozmezí úhlů je na obrázku 42 a na Obrázku 43 je provedena kontrola hrotu pomocí měřidla. [21]



Obrázek 42: Znázornění rozmezí úhlů [21]



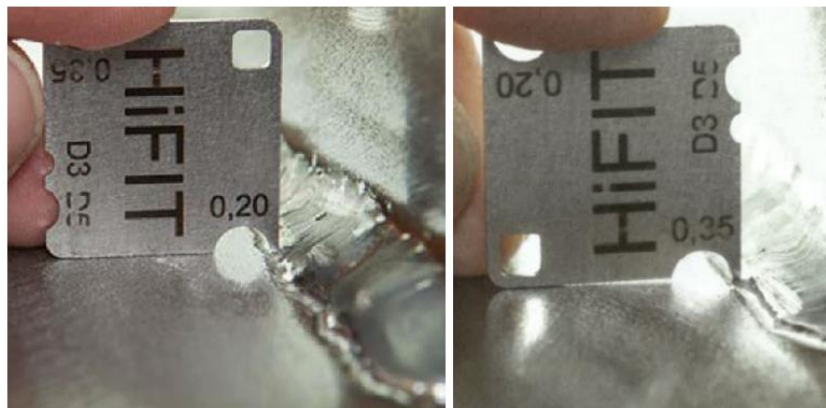
Obrázek 43: Kontrola hrotu pomocí měřidla [21]

Kontrola po oklepání se provádí vizuálně pomocí speciálního měřidla. Hrot měřidla o velikosti 0,20 mm byl umístěn do drážky. Pokud by byla mezera na spodní straně, drážka není dostatečně hluboká. Ilustrace měření je zobrazena na Obrázku 44, kde vlevo je zkontrolována minimální hloubka drážky 0,20 mm, napravo u měřidla 0,35 mm je už mezera pod měřidlem.

Při měření byly kontrolovány následující charakteristiky, které by měla správně vytvořená drážka splňovat:

- Drážka by měla být kontinuální a obklopovat celý svar na spojnici se základním materiálem.
- Hloubka drážky by měla být minimálně 0,2 mm a maximálně 0,35 mm.
- Měření drážky se provádí speciálním měřidlem.
- Drážka by měla být hladká a bez viditelných otřepů. Pokud jsou otřepy přítomny, je nutné upravit intenzitu tlaku. [21]

V případě, že hloubka drážky nesplňovala požadované hodnoty, bylo nezbytné svar opravit a celý proces zopakovat.



Obrázek 44: Kontrola měrkou; vlevo 0,20 mm; vpravo 0,35 mm [21]

Pro metodu HFMI byl zvolen indentor o průměru 3 mm. Opracované paty svary byly zkontrolovány měrkou, aby se zkontrolovaly rozměry drážky, které musí být splněny, aby HFMI dosáhlo požadovaných účinků. Hloubka vytvořené drážky byla v požadovaném rozmezí.

## 9.4 Vyhodnocení druhé únavové zkoušky

Po opravě a případném oklepaní jednotlivých vzorků byly připravené na druhé únavové testování. Cílem tohoto testování bylo ověřit, zda metoda HFMI zvýší životnost svarového spoje i v případě, že byl předtím opraven pomocí převaření. Nastavené parametry pro druhou zkoušku byly totožné s parametry v první zkoušce.

Výsledky a nastavené parametry jsou uvedeny v Tabulce 10.

Tabulka 10: Výsledky a parametry druhé únavové zkoušky

Vzorek	$F_{\max}$ [kN]	$F_{\min}$ [kN]	Počet cyklů do porušení [-]	Kritérium ukončení zkoušky [mm]	Opravený svar bez HFMI Počet cyklů do porušení	Opravený svar s HFMI Počet cyklů do porušení
1	6	0,86	10 000 000	-2,7		
2	6	0,86	10 000 000	-2,7		
3	6	0,86	10 000 000	-2,7		
4	6	0,86	978 802	-2,7		2 924 106
5	6	0,86	375 117	-2,7		10 000 000
6	6	0,86	240 562	-2,7	579 158	
7	7	1	247 643	-2,7		1 872 460
8	7	1	141 911	-2,7	367 616	
9	7	1	230 719	-2,7		10 000 000
10	7	1	323 535	-2,7	247 212	
11	7	1	397 932	-2,7		10 000 000
12	7	1	263 396	-2,7	454 683	

Při porovnání výsledků je patrné, že opravené vzorky metodou HFMI mají znatelně vyšší životnost než vzorky, které byly pouze opraveny. U třech oklepaných vzorků nedošlo porušení, a tak u nich byly únavové zkoušky ukončeny po dosažení  $10^7$  cyklů.

Dále lze pozorovat i zlepšení únavové životnosti vzorků, které byly opraveny převařením ve srovnání s životností, která byla zkoumána v první únavové zkoušce. Důvodem může být lepší geometrie svaru, která má na únavovou životnost velký vliv. Je možné že ve svarovém spoji došlo k vytvoření lepšího svaru, z důvodu umístění kořenové vrstvy do vzniklé vybroušené mezery, na kterou se navařila následně krycí vrstva.

Ze získaných dat byly sestaveny S-N křivky pro všechny výsledky (viz Obrázek 45). Lze pozorovat zvýšenou únavovou životnost převařených vzorků při nižším počtu cyklů. S rostoucím počtem cyklů odolnost klesá a při dosažení  $10^7$  cyklu je téměř stejná.

V případě vzorků opravené HFMI byly 3 vzorky bez porušení a dva s porušením ze kterých se sestrojila únavová křivka. Na hranici únavové pevnosti ( $10^7$  cyklu) je rovna hodnota rozkmitu napětí  $\Delta\sigma = 168 \text{ MPa}$  pro křivku opravených vzorků s HFMI. Pro nové vzorky a pro opravené vzorky bez HFMI je hodnota rozkmitu napětí na této hranici  $\Delta\sigma \approx 108 \text{ MPa}$ . Při přepočtu na procenta vychází zlepšení únavové životnosti zhruba o 55 %. Z hlediska životnosti došlo ke zvýšení životnosti o celý řád.

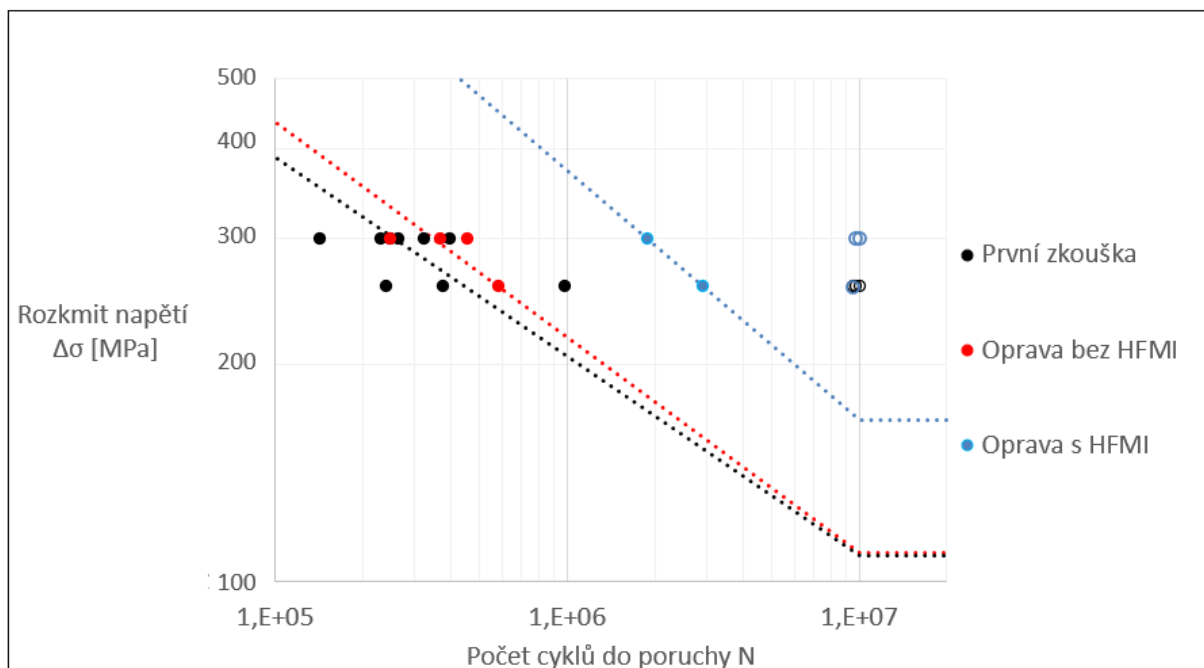
Přestože pro opravené vzorky je množství dat relativně limitované, byla provedena na základě těchto dat alespoň odhad S-N křivek. K vytvoření S-N křivek byla použita rovnice ve tvaru:

$$\log N = q - m \log \Delta\sigma$$

K získání parametrů  $q$  a  $m$  byla použita po získání výsledků lineární regrese. Při lineární regresi dojde k proložení bodů přímkou s nejmenším rozptylem. Po získání dat byly dopočteny potřebné hodnoty pro vytvoření S-N křivky pro jednotlivé výsledky únavových zkoušek. Na obrázku 45 jsou všechny křivky zobrazeny s 50% spolehlivostí. V případě, že by bylo potřeba pracovat s jinou spolehlivostí měla by rovnice tvar:

$$\log N = q - s * d - m \log \Delta\sigma,$$

kde  $s$  je směrodatná odchylka závislé proměnné  $\log N$  a  $d$  je počet směrodatných odchylek.



Obrázek 45: S-N diagram všech únavových zkoušek

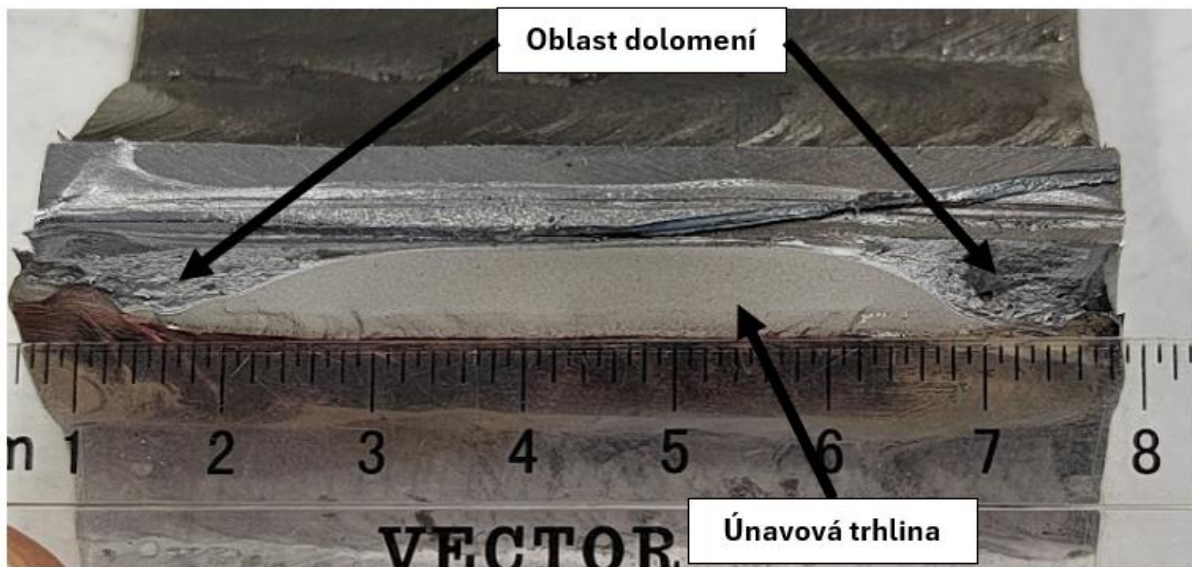
## 9.5 Dolomení vzorků

Po skončení druhé únavové zkoušky byly vybrány vzorky s označením 6, 7 a 8 jako vhodné vzorky pro dolomení a prozkoumání, jak se šířila únavová trhлина a jakých dosáhla rozměrů. Všechny vzorky byly naříznuté z druhé strany úhlovou bruskou a následně dolomeny.

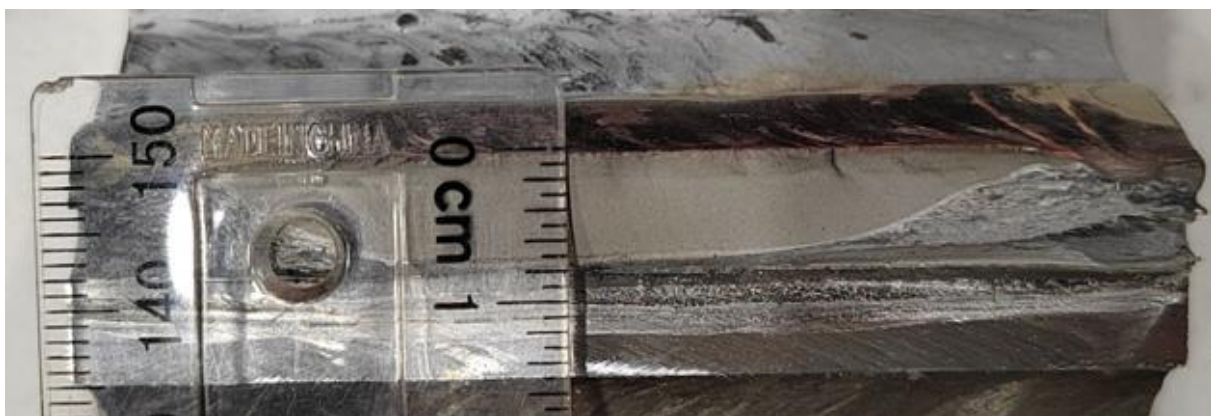
### 9.5.1 Vzorek 6

Vzorek 6 patří do skupiny vzorků, které byly pouze při opravě převařeny. Při druhé únavové zkoušce bylo dosaženo kritéria ukončení zkoušky při 579 158 cyklech. Zároveň je jediný z trojice vybraných vzorků, na který působilo maximální zatížení 6 kN.

Na obrázcích 46 a 47 je zobrazena nafocená únavová trhлина s přiloženým pravítkem. Z naměřených rozměrů lze stanovit, že trhлина dosáhla šířky 57 mm a působilo do hloubky 7 mm. Trhлина se roztáhla téměř po celé šířce vzorku a lze pozorovat relativně široké pásmo které působilo do hloubky 7 mm. V tomto případě se trhлина začala inicializovat v prostředku vzorku.



Obrázek 46: Šířka únavové trhliny



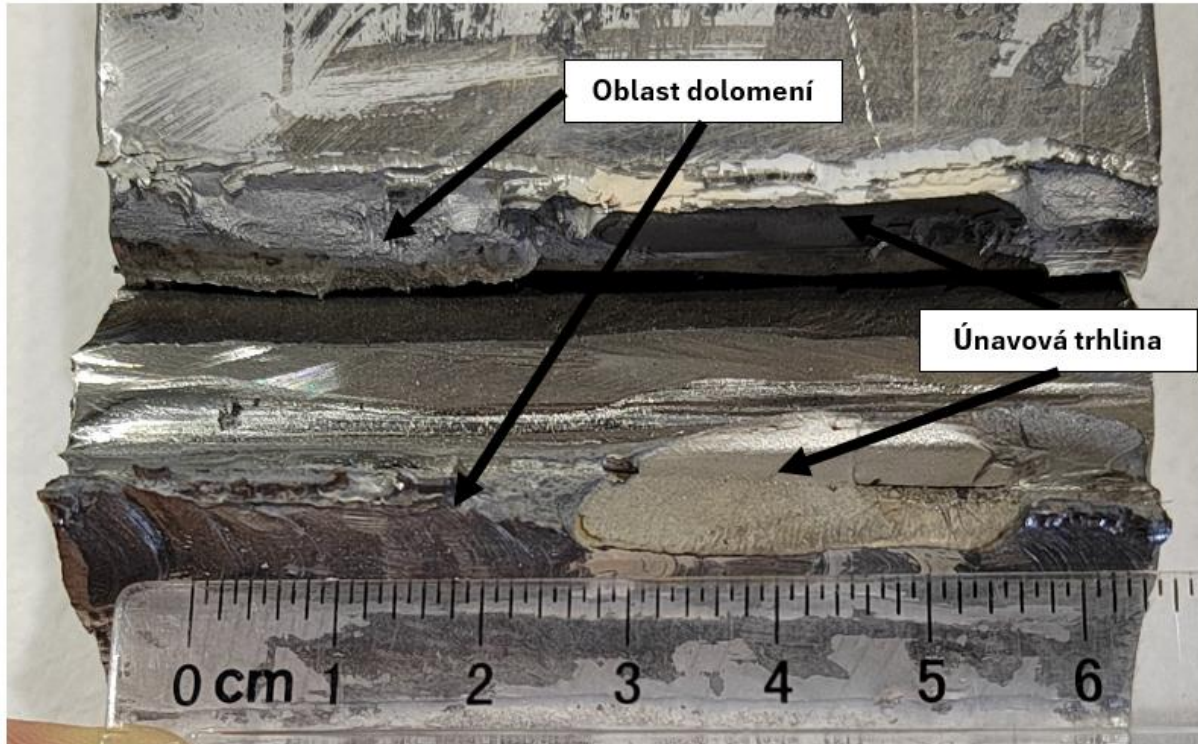
Obrázek 47: Hloubka únavové trhliny



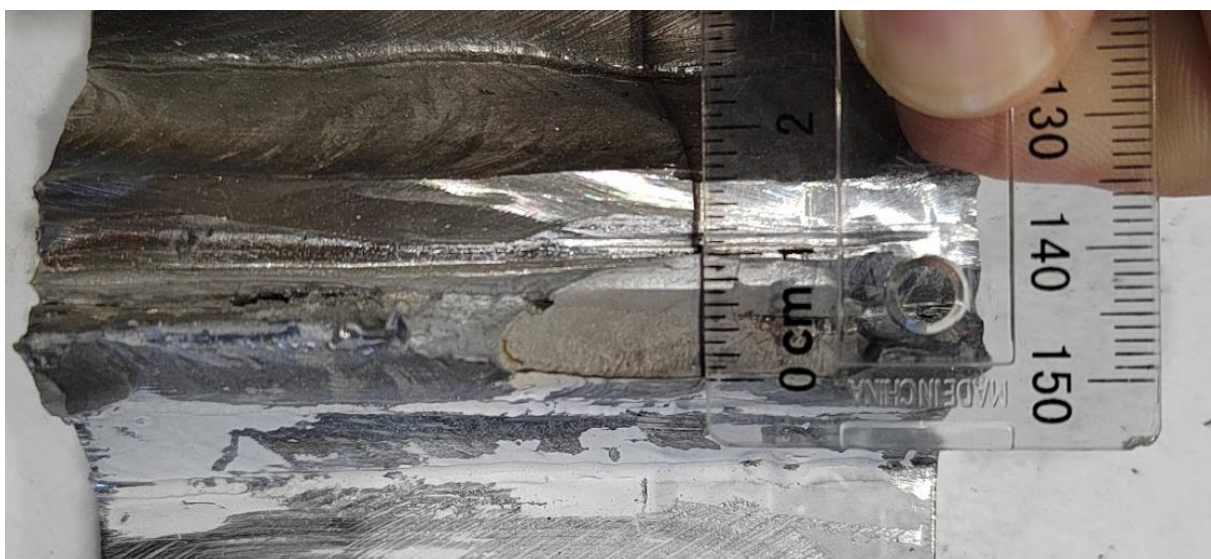
### 9.5.2 Vzorek 7

Vzorek 7 byl jako jediný z trojice opraven a následně opracován metodou HFMI. Dosažení kritéria pro ukončení zkoušky došlo při dosažení 1 872 460 cyklu. Vzorek byl zatížen maximální silou 7 kN.

Na obrázcích 48 a 49 je opět nafocena únavová trhлина. Trhлина na tomto vzorku dosáhla šířky 30 mm a působila do hloubky 10 mm. Trhлина v tomto případě začala inicializovat spíše v pravé části.



Obrázek 48: Šířka únavové trhliny

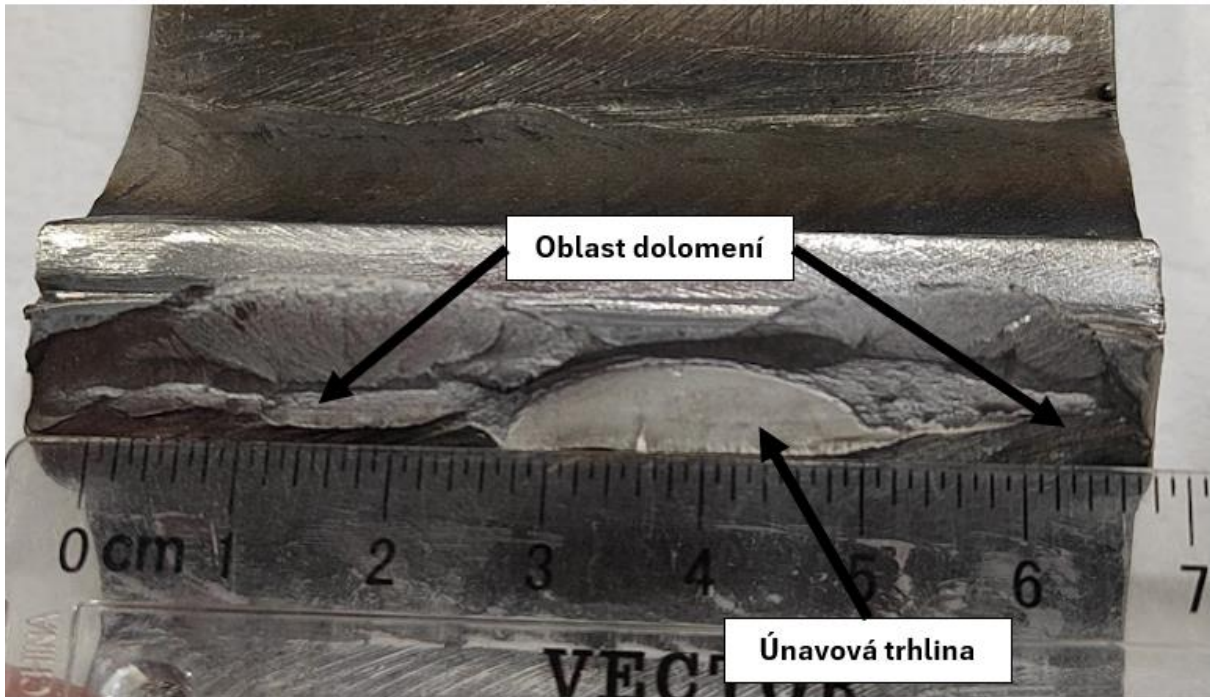


Obrázek 49: Hloubka únavové trhliny

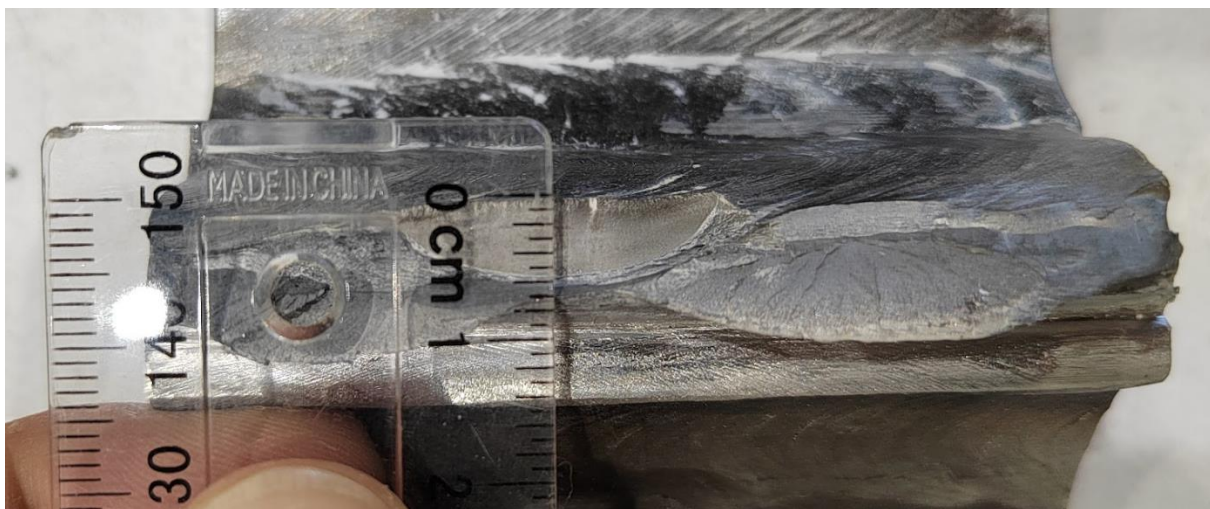
### 9.5.3 Vzorek 8

Vzorek 8 byl podobně jako vzorek 6 pouze opraven bez aplikace HFMI. U tohoto vzorku došlo k ukončení zkoušky při dosažení 367 616 cyklu. Vzorek byl zatížen maximální silou o hodnotě 7 kN.

Na obrázcích 50 a 51 je zobrazena vzniklá únavová trhлина. Pomocí měření byla stanovena šířka trhliny na 27 mm a působila do hloubky 6 mm. Trhлина se začala inicializovat opět spíše na pravé straně, ovšem nyní blíže ke středu vzorku ve srovnání se vzorkem 7.



Obrázek 50: Šířka únavové trhliny



Obrázek 51: Hloubka únavové trhliny

#### 9.5.4 Shrnutí dolomených vzorků

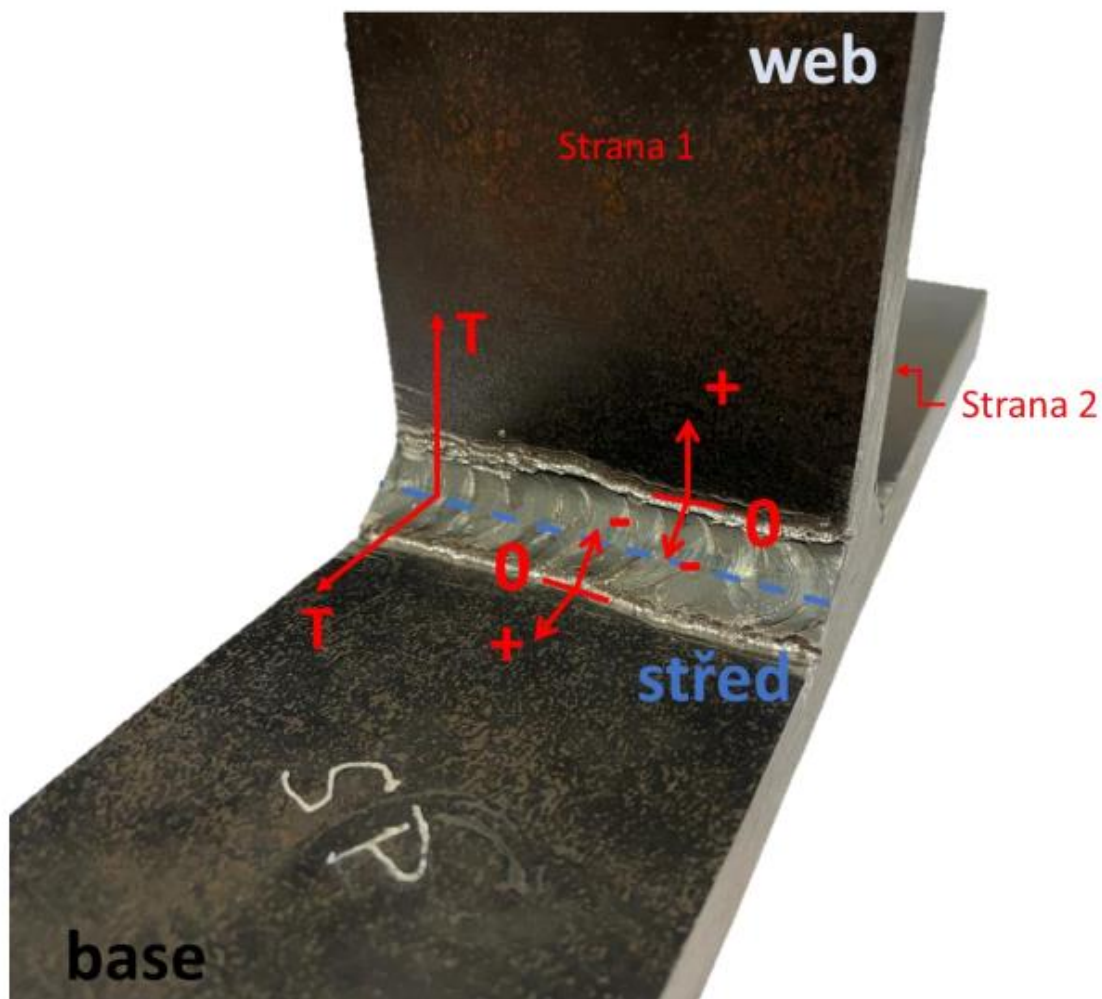
Vzorek 6 vykazuje oproti ostatním vzorkům trhlinu znatelně větších rozměrů. Zároveň se trhlinka začala inicializovat ve středu vzorku. Jelikož působilo menší zatížení vzorku při srovnání se vzorkem 8 došlo k delšímu šíření trhliny. U vzorků 7 a 8 se inicializovaly trhliny spíše na pravé straně vzorku a jejich šířka nedosahovala takových rozměrů jako v případě šestého vzorku.

## 10 Zbytkové napětí

Pro zjištění zbytkového napětí byly poslány vzorky na Katedru inženýrství pevných látek FJFI ČVUT. Tam proběhla rentgenová difrakční analýza makroskopických zbytkových napětí svarů jak před ošetření, tak i po ošetření metodou HFMI.

### 10.1 Zkoumaný vzorek

Difrakční experimenty byly provedeny na koutovém svaru před finálním opracováním metodou HFMI. Stav zbytkové napjatosti byl analyzován na kritických místech svaru, viz Obrázek 52: přechod svar-deska „web“ a „base“. Analýza probíhala na obou stranách desky ve směru T kolmém na svar, tj. směr zatěžování při únnavových zkouškách.



Obrázek 52: Analyzovaná deska, značení směrů a analyzovaných oblastí.

### 10.1.1 Parametry a experimentální uspořádání

Difrakční měření bylo prováděno na difraktometru X'Pert Pro MPD v Braggově-Brentanově

geometrii s následujícími parametry:

- interval měření  $2\theta_p-2\theta_k$ :  $149,7^\circ-161,5^\circ$ ,
- velikost kroku  $\Delta 2\theta$ :  $0,25^\circ$ ,
- 15 náklonů úhlu  $\psi$  vzhledem k rovině svařovaných desek, tj.  $\sin 2\psi = 0,024; 0,05; 0,1; \dots 0,7$  pro záporné hodnoty  $\psi$ .
- rentgenka s chromovou anodou

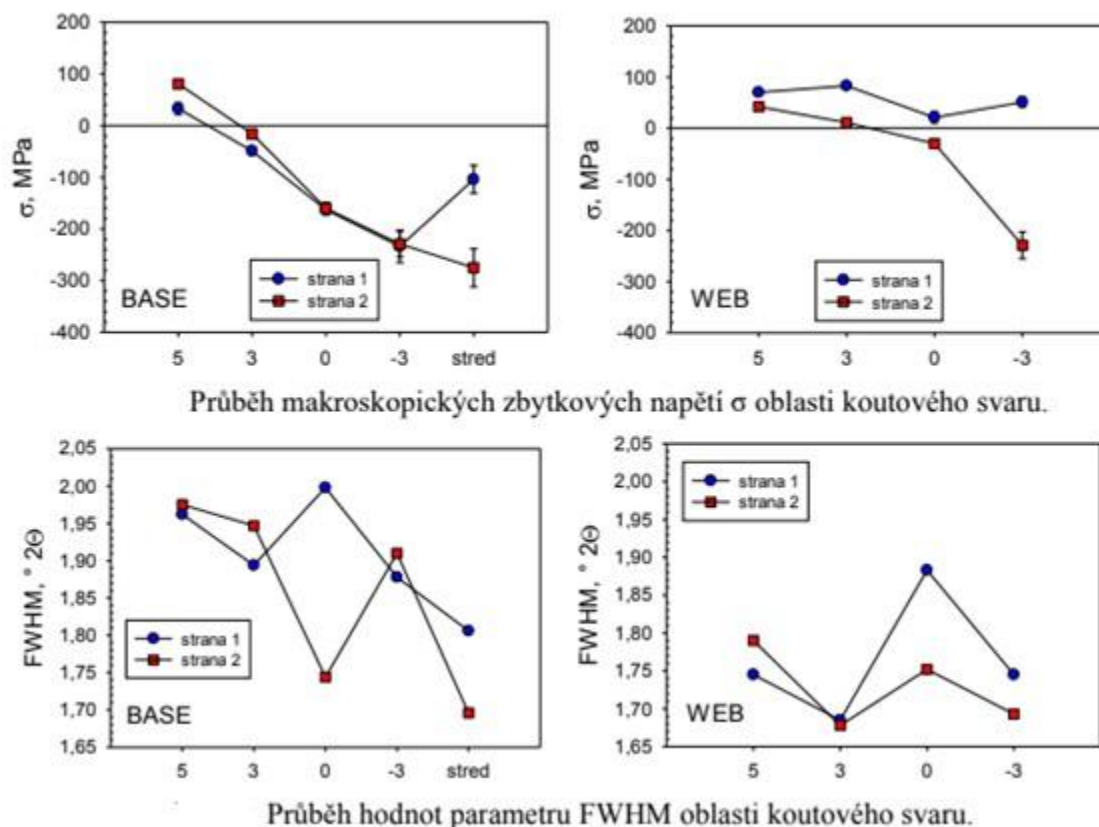
Byla analyzována difrakční linie  $\{211\}$  fáze  $\alpha$ -Fe. Hodnoty zbytkových napětí byly vypočteny z mřížkových deformací stanovených na základě experimentálních závislostí  $2\theta(\sin 2\psi)$  za předpokladu dvouosého stavu zbytkové napjatosti ( $\theta$  je difrakční úhel,  $\psi$  – úhel mezi povrchem vzorku a difraktujícími mřížkovými rovinami). Difrakční úhel  $2\theta^{211}$  byl určován jako těžiště dubletu  $CrK\alpha 1\alpha 2$  difraktovaného mřížkovými rovinami  $\{211\}$  fáze  $\alpha$ -Fe.[22]

### 10.1.2 Naměřené hodnoty

Hodnoty makroskopických zbytkových napětí a FWHM (pološírka difrakční linie) parametru získaných z analyzovaných oblastí jsou uvedeny v následujícím Obrázku 53 a v Tabulce 11.

Tabulka 11: Hodnoty makroskopických zbytkových napětí a parametrů [22]

		Strana 1			Strana 2		
deska	vzdálenost, mm	$\sigma$ , MPa	$\Delta\sigma$ , MPa	FWHM, $^\circ$ $2\theta$	$\sigma$ , MPa	$\Delta\sigma$ , MPa	FWHM, $^\circ$ $2\theta$
base	5	33	11	1,962	81	5	1,975
	3	-49	7	1,894	-16	6	1,947
	0	-163	9	1,998	-160	11	1,744
	-3	-234	31	1,878	-229	25	1,910
	střed	-104	27	1,806	-275	37	1,696
web	-3	51	9	1,745	-229	26	1,693
	0	21	11	1,883	-30	9	1,752
	3	83	4	1,685	11	4	1,678
	5	70	3	1,745	42	5	1,790



Obrázek 53: Grafických průběh zbytkového napětí a grafický průběh hodnot parametru FWHM [22]

Z výsledků lze vyvodit následující:

- Zbytková napětí (ZN) na povrchu desek dosahují tahových hodnot až 100 MPa.
- Na straně 2 v oblasti svaru byla zjištěna vysoká tlaková ZN cca 200–300 MPa.
- Hodnoty ZN v oblasti svaru se pro jednotlivé strany liší. Na straně 1 tlaková i tahová ZN v absolutní hodnotě nižší v porovnání se stranou 2.
- Nižší hodnoty tlakových ZN byly určeny v okolí přechodu svar-deska „web“.

Hodnoty FWHM vykazují značný rozptyl. To značí nehomogenitu velikosti krystalů, mikrodeformace, nebo hustotu dislokací. Na desce s označením „base“ dosahuje vyšších hodnot. Rozdílné hodnoty zbytkového napětí a FWHM pravděpodobně souvisí s deformací desek, ke které došlo během svařování.

## 10.2 Vzorek s aplikací HFMI

Na Katedru inženýrství pevných látek FJFI ČVUT byl poslán i vzorek, na kterém byla aplikovaná metoda HFMI. Opět proběhla rentgenová difrakční analýza makroskopických zbytkových napětí svarů jak před ošetření, tak i po ošetření metodou HFMI.

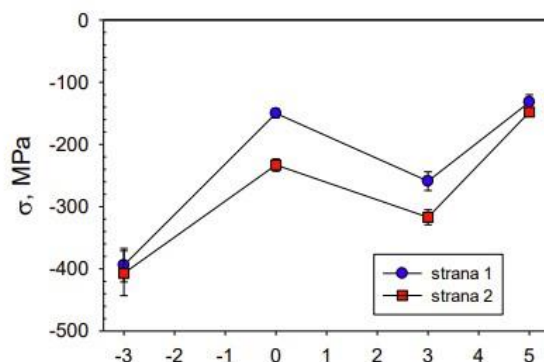
Parametry a experimentální uspořádání uvedeno v předchozí podkapitole zůstalo stejné v během tohoto měření.

### 10.3 Naměřené hodnoty<sup>2</sup>

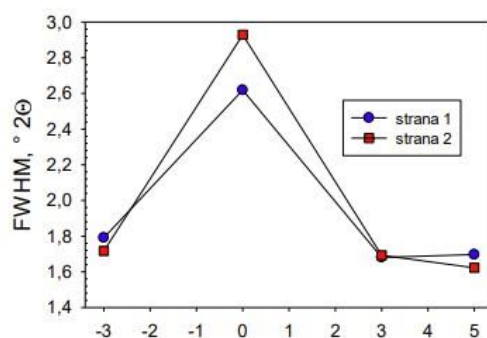
Hodnoty makroskopických zbytkových napětí a FWHM (pološířka difrakční linie) parametru získaných z analyzované oblasti jsou uvedeny v následujícím Obrázku 54 a v Tabulce 12. V tomto případě se analyzovala pouze oblast přechodu mezi svar-deska „web“. Analýza opět probíhala na obou stranách desky ve směru T kolmém na svar, tj. směr zatěžování při únavových zkouškách.

Tabulka 12: Hodnoty makroskopických zbytkových napětí a parametrů [22]

vzdálenost, mm	Strana 1			Strana 2		
	$\sigma$ , MPa	$\Delta\sigma$ , MPa	FWHM, ° 2 $\theta$	$\sigma$ , MPa	$\Delta\sigma$ , MPa	FWHM, ° 2 $\theta$
-3	-394	27	1,791	-407	36	1,717
0	-150	7	2,619	-233	10	2,929
3	-259	15	1,681	-317	12	1,693
5	-132	12	1,697	-148	6	1,623



Průběh makroskopických zbytkových napětí  $\sigma$  na povrchu svaru vzorku SP.



Průběh hodnot parametru FWHM na povrchu svaru vzorku SP.

Obrázek 54: Grafický průběh zbytkového napětí a grafický průběh hodnot parametru FWHM [22]

<sup>2</sup> Výsledky poslaného vzorku s aplikací HFMI po absolvování  $10^7$  cyklů nestihly dorazit v termínu odevzdání diplomové práce. Z tohoto důvodu budou uvedeny výsledky vzorku z jiného projektu. Tento vzorek byl také opracován metodou HFMI a je ze stejného materiálu a stejné geometrie. Tím lze alespoň orientačně vyhodnotit zbytkové napětí po aplikaci HFMI.

## 11 Diskuse výsledků

Provedlo se únavové testování na 12 připravených vzorkách na zkušebním standu. Všechny zkoušky byly řízeny silou, jednalo se vždy o zatěžování konstantní amplitudou. Pro 6 vzorků bylo nastaveny hodnoty zatěžování na  $F_{\max} = 7$  kN,  $F_{\min} = 1$  kN, pro další šestici vzorků byla snížena maximální hodnota zatěžování na  $F_{\max} = 6$  kN,  $F_{\min} = 0,86$  kN. Asymetrie cyklu byla pro všechny vzorky  $R=0,14$  a frekvence zatěžování byla 15 Hz. Pro zjištění hraničního parametru bylo připraveno několik vzorků, na kterých se testovalo kritérium ukončení zkoušek. Jako ideální kritérium pro ukončení zkoušek bylo považováno ohnutí vzorku o 2,7 mm ve směru zatěžování. Při této hodnotě vznikala trhlina požadovaných rozměrů v patě svaru. Pokud byl detekován posun o 2,7 mm byla zkouška ukončena. V případě, že k detekci posunu nedošlo, byla únavová zkouška ukončena při dosažení  $10^7$  cyklu.

Po prvních únavových zkouškách byla úspěšně vytvořena požadovaná trhlina na devíti z dvanácti zkoumaných vzorků. 3 vzorky dosáhly  $10^7$  cyklu bez porušení. Možnou příčinou rozptylu výsledků byl nejspíše lidský faktor při svařování. Získané hodnoty devíti vzorků posloužily pro vytvoření S-N křivky.

Po únavovém testování následovalo opravení trhlín. Trhlina se detekovala pomocí kapilární zkoušky a následně se postižená oblast vzorků vybrousila. Poté byly vzorky převařeny a po očištění vzorků byla na 5 vzorcích aplikovaná metoda HFMI na paty svaru, na zbylé aplikovaná nebyla. Aplikace HFMI byla zkontrolována pomocí speciálních měřidel.

Cílem dalšího únavového testování bylo ovařit, zda metoda HFMI zvýší životnost svarového spoje i v případě, že byl předtím opraven pomocí převaření. Nastavené parametry pro druhou zkoušky byly totožné s parametry v první zkoušce. Opravené vzorky pouze převařením dosáhly vždy kritéria o ukončení zkoušky. V případě opravených vzorků s HFMI došlo u tří z pěti vzorků dosažení  $10^7$  cyklu bez porušení a zkoušky byly následně ukončeny. Ze získaných výsledků byly vytvořeny a porovnány S-N křivky.

Hypotéza před experimentem byla taková, že opravený svarový spoj bude mít po aplikaci HFMI vyšší únavovou životnost, než pouze opravený spoj. Získané výsledky potvrzují pozitivní vliv metody HFMI na únavovou životnost svarového spoje po aplikaci HFMI. Životnost byla zlepšena přibližně o 55 %. Dále lze pozorovat i zlepšení únavové životnosti vzorků, které byly opraveny převařením ve srovnání s životností, která byla zkoumána v první únavové zkoušce. Důvodem může být lepší geometrie svaru.

Výsledky z kapitoly o zbytkovém napětí dokazují pozitivní vliv HFMI na zbytkové napětí ve vzorku po svařování. Pro porovnání výsledků se použijí data naměřená na přechodu svar-deska „web“. U vzorku, který byl pouze převařený bylo naměřeno pouze tahové napětí na „straně 1“. Na „straně 2“ se vyskytují jak tahová, tak i tlaková zbytková napětí. Vzorek, který byl opraven HFMI má změřená zbytková napětí pouze tlaková na obou stranách. HFMI ovlivnilo především okolí svého místa působí, kdy lze pozorovat nárůst zbytkového tlakového napětí v obou směrech. S rostoucí vzdáleností od 3 mm klesá hodnota tlakového napětí. Data zpracována z opracovaného vzorku jsou pouze orientační, ale dá se předpokládat, že i na vzorku z experimentální části budou změřena čistě tlakové zbytkové napětí.

Podobně jako výsledky experimentů zmíněných v rešerši i zde se dosáhlo pozitivního výsledku. Ve srovnání s diplomovou prací (rešerše; kapitola 6.3), na kterou tento experiment navazoval, se při prvních zkouškách pro nakmitání trhliny dosáhlo mírně nižší únavové životnosti i přesto, že se prováděly testy na stejném materiálu S460MC.

Je vhodné uvést několik parametrů, které zapříčinily tyto rozdílné výsledky:

- Svařovací parametry

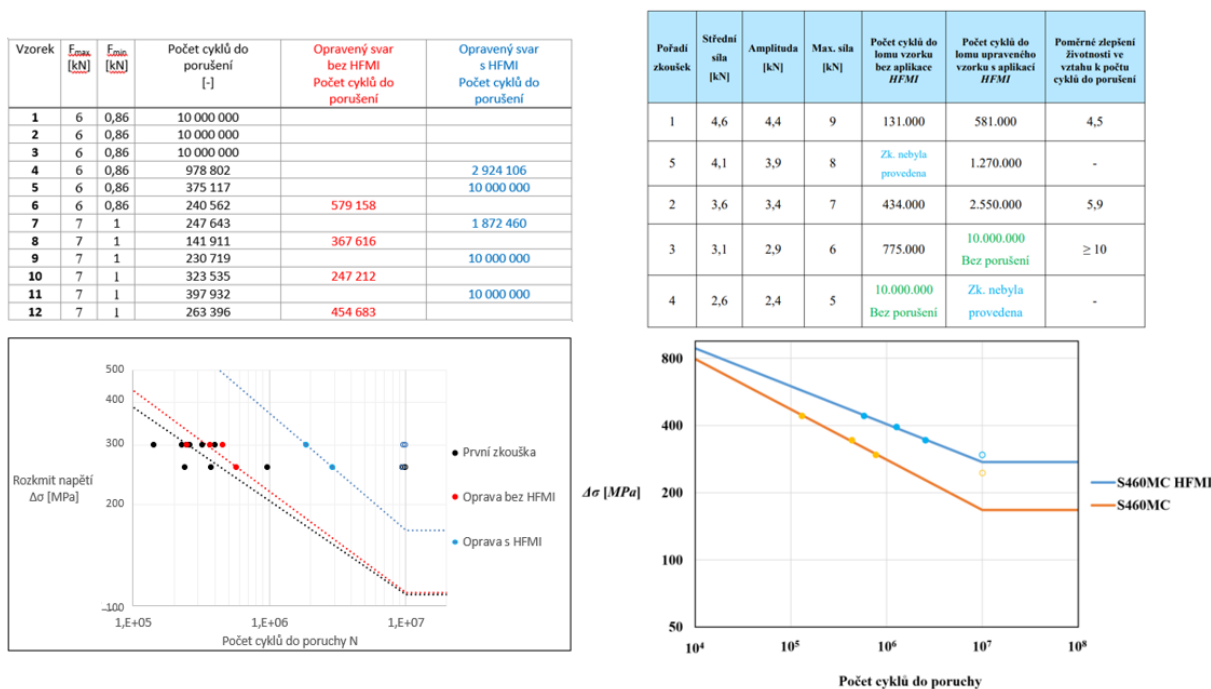
Oba experimenty měly odlišné svařovací parametry. To ovlivnilo vyšší provaření, geometrii svaru, velikost zbytkového pnutí po svařování a teplem ovlivněnou oblast.

- Parametry únavových zkoušek

Jak je vidět při porovnání tabulek viz Obrázek 55 tento experiment pracoval se dvěma amplitudami, které zůstaly stejné pro několik vzorků. V případě druhého experimentu se zkoumalo několik hodnot amplitud.

- Kritérium ukončení zkoušky

Největším parametrem, který se liší v obou zkouškách je kritérium pro ukončení zkoušky. V tomto experimentu byl parametr nastaven na 2,7 mm ohnutí ve směru zatížení. U druhého experimentu byl nastaven na 5 mm. To je hlavní důvod, proč se například při amplitudě 2,9 kN nebo 2,7 kN (nejbližší hodnoty k amplitudě 3 a 2,57 kN) dosáhlo většího počtu cyklů do porušení vzorku.



Obrázek 55: Porovnání výsledků experimentů



## 12 Závěr

Cílem práce bylo ověření možnosti opravy únavové trhliny s využitím metody HFMI. Zároveň se ověřovala hypotéza, že opravený svarový spoj s následným oklepáním bude mít vyšší únavovou životnost ve srovnání s pouze převařeným spojem. Na základě hypotézy byl proto navržen experiment, na který doposud nebyla provedena žádná studie.

Teoretická část se zaměřila na popsání životnosti svarového spoje a na popsání samotné technologie HFMI, včetně jejího zařízení, příprav svaru a vyhodnocení. V rešerší části byly uvedeny tři práce, které se zabývaly zlepšováním únavové životnosti na odlišných materiálech a posloužily jako inspirace pro zpracování a případně pro srovnání získaných výsledků.

Pro uskutečnění experimentu bylo vyrobeno 12 vzorků z oceli S460MC. Vzorky měly tloušťku plechu 15 mm, svařeny byly metodou MAG a následně nařezány na šířku 74 mm. Před první únavovou zkouškou bylo zhotoveno ještě navíc pět zkušebních vzorků, které posloužily pro určení hraničního kritéria pro ukončení zkoušky. Kritériem posloužilo pro vytvoření požadované únavové trhliny.

Výsledky z první únavové zkoušky byly zpracovány a vytvořila se S-N křivka, která je charakterizována odpovídající rovnicí. Hodnoty rovnice jsou v dobré shodě s hodnotami, které předpokládá norma Eurokód 3. Tři vzorky z dvanácti nedosáhly stanoveného kritéria porušení a nedošlo ke vzniku trhliny. Důvodem je, že únava materiálu má charakter náhodné veličiny.

Po první zkoušce následovaly opravy trhliny ve svaru, při kterých se využilo broušení, převaření a u šesti vzorků došlo k aplikaci HFMI. Poté byly vzorky podrobeny druhým únavovým zkouškám na zkušebním standu.

Získaná data z druhého únavového testování posloužila opět k vyhodnocení v podobě S-N křivek. Změřená data a sestrojené S-N křivky potvrzují pozitivní vliv metody HFMI na zvýšení životnosti svarového spoje po opravě zhruba o 55 %. Zároveň se tím potvrdila platnost hypotézy a je možné stanovit, že opravený svarový s následnou aplikací HFMI má vyšší únavovou životnost, než spoj pouze převařený a dokonce i než spoj původní.

## 13 Zdroje

- [1] HOBACHER, A. F. *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. Online. 2nd edition. Springer Cham, 2016. ISBN 978-3-319-23756-5. Dostupné z: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-23757-2>. [cit. 2023-11-12].
- [2] ČSN EN 1993-1-9, *Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-9: Únava*.
- [3] BENEŠ, Petr. *Únava materiálu*. Přednáška KMM/ZDM. Plzeň, 2023.
- [4] STOLÁŘ, Jakub. *POROVNÁNÍ KRITÉRIÍ ÚNAVOVÉHO PORUŠENÍ PŘI PULZUJÍCÍM NAMÁHÁNÍ V JEDNOOSÉM TAHU*. Bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2015.
- [5] MARQUIS, Gary B. a BARSOUM, Zuheir. *IIW Recommendations for the HFMI Treatment*. Springer Singapore, 2016. ISBN 978-981-10-2503-7.
- [6] BRTNÍK, Tomáš a MIKA, Ivan. *Zvyšování únavové životnosti svarů vysokopevnostních ocelí metodou HFMI*. Online. In: [Http://old.konstrukce.cz](http://old.konstrukce.cz). 2016. Dostupné z: <http://old.konstrukce.cz/clanek/zvysovani-unavove-zivotnosti-svaru-vysokopevnostnich-oceli-metodou-hfmi/>. [cit. 2023-11-06].
- [7] ČSN EN ISO 5817, *Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) - Stupně kvality pro vady*.
- [8] *Darability for welded constructions*. Online. 2023. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/dokument/NcygMHJcnoT35bbh>. [cit. 2023-11-12].
- [9] *Ultrasonic impact treatment - HFMI*. Online. 2023. Dostupné z: <https://sonats-et.com/wp-content/uploads/sites/3/2018/04/01-EN-Process-UIT-SONATS-1.pdf>. [cit. 2023-11-12].
- [10] ČSN EN ISO 17637, *Nedestruktivní zkoušení svarů - Vizuální kontrola tavných svarů*.
- [11] ČSN EN ISO 3452-1, *Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení kapilární metodou - Část 1: Obecné zásady*.
- [12] ČSN EN ISO 9934-1, *Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení magnetickou práškovou metodou - Část 1: Obecné principy*.
- [13] *Magnetická prášková metoda*. Online. In: [Weldinspect](http://www.weldinspect.cz). 2023. Dostupné z: <https://www.weldinspect.cz/magneticka-metoda-praskova>. [cit. 2023-11-29].
- [14] GHAREMANI, Kasra; RANJAN, Rakesh; WALBRIDGE, Scott Walbridge a INCE, Ayhan. *Fatigue Strength Improvement of Aluminum and High Strength Steel Welded Structures using High Frequency Mechanical Impact Treatment*. Online. In: [Sciencedirect](http://www.sciencedirect.com). 2015. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187770581504535X>. [cit. 2024-04-07].
- [15] HARATI, Ebrahim; SVENSSON, Lars-Erik; KARLSSON, Leif a WIDMARK, Mattias. *Effect of high frequency mechanical impact treatment on fatigue strength of welded 1300 MPa yield strength steel*. Online. In: [Sciencedirect](http://www.sciencedirect.com). 2016. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112316301633>. [cit. 2024-04-07].
- [16] OZOM, Bořek. *Zvyšování únavové životnosti svarů vysokopevnostních ocelí metodou HFMI*. Diplomová. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní, 2022.
- [17] *Materiálový list oceli 1.0982*. Online. [Kovintrade](http://www.kovintrade.cz). Dostupné z: <https://www.kovintrade.cz/1-0982/>. [cit. 2024-04-10].

- [18] KOWAX SVÁŘECÍ DRÁT G4SII 1,0MM 15KG POMĚDĚNÝ. Online. Svarecky-obchod. Dostupné z: <https://www.svarecky-obchod.cz/55879-kowax-svareci-drat-g4sil-1-0mm-15kg-pomedeny>. [cit. 2024-04-11].
- [19] HAKIMI, POJA SHAMS. *POST WELD TREATMENT IMPLEMENTATION ON BRIDGES – WITH SPECIAL FOCUS ON HFMI*. Online. In: Trafikverket. 2014. Dostupné z: <https://trafikverket.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1835278&dswid=1138>. [cit. 2024-04-20].
- [20] Smida, M., Senk, B. and Strähuber, V. (2009), Versuche und Anwendung hochfrequenter Hämmerverfahren als Schweißnahtnachbehandlung. *Stahlbau*, 78: 650-661. <https://doi.org/10.1002/stab.200910080>
- [21] *Operating Instructions HiFIT Device Type HFM 21R1-S*. Online. In: Hifit. 2021. Dostupné z: [https://www.hifit.de/fileadmin/user\\_upload/Daten/Premium\\_HFM\\_21R-S/Betriebsanleitungen/210816\\_HFM21R1-S\\_Betriebsanleitung\\_en.pdf](https://www.hifit.de/fileadmin/user_upload/Daten/Premium_HFM_21R-S/Betriebsanleitungen/210816_HFM21R1-S_Betriebsanleitung_en.pdf). [cit. 2024-04-20].
- [22] ČAPEK, Jiří; TROJAN, Karel a GANEV, Nikolaj. *Difrakční analýza makroskopických zbytkových napětí koutových svarů ošetřených metodou HFMI: Zpráva o rentgenografické difrakční analýze vypracovaná na Katedře inženýrství pevných látek FJFI ČVUT pro Regionální technologický institut Fakulty strojní Západočeské univerzity v Plzni*. 2023.
- [23] *Material Fatigue*. Online. In: Comsol. 2017. Dostupné z: <https://www.comsol.com/multiphysics/material-fatigue>. [cit. 2024-05-17].
- [24] GUANYING, LI a YIDONG, WU. *A STUDY OF THE THICKNESS EFFECT IN FATIGUE DESIGN USING THE HOT SPOT STRESS METHOD*. Online, Diplomová. Göteborg, Švédsko: CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 2010. Dostupné z: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/132254.pdf>. [cit. 2024-05-17].